



**ITS**

Institut  
Teknologi  
Sepuluh Nopember

TUGAS AKHIR - TE 141599

## IDENTIFIKASI KERUSAKAN HUBUNG SINGKAT FASA KE TANAH PADA MOTOR BLDC MENGGUNAKAN METODE EAR

Achmad Irmawanto Shodek  
NRP 07111440000056

Dosen Pembimbing  
Dr. Eng. I Made Yulistya Negara S.T., M.Sc  
Dimas Anton Asfani S.T., M.T., PhD

DEPARTEMEN TEKNIK ELEKTRO  
Fakultas Teknologi Elektro  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember  
Surabaya 2018



TUGAS AKHIR - TE 141599

**IDENTIFIKASI KERUSAKAN HUBUNG SINGKAT FASA  
KE TANAH PADA MOTOR BLDC MENGGUNAKAN  
METODE EAR**

Achmad Irmawanto Shodek  
NRP 07111440000056

Dosen Pembimbing  
Dr. Eng. I Made Yulistya Negara S.T., M.Sc  
Dimas Anton Asfani S.T., M.T., PhD

DEPARTEMEN TEKNIK ELEKTRO  
Fakultas Teknologi Elektro  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember  
Surabaya 2018



**ITS**

Institut  
Teknologi  
Sepuluh Nopember

FINAL PROJECT - TE 141599

## FAULT IDENTIFICATION OF PHASE GROUND SHORT CIRCUIT OF BLDC MOTOR USING EAR METHODS

Achmad Irmawanto Shodek  
NRP 07111440000056

Supervisors

Dr. Eng. I Made Yulistya Negara S.T., M.Sc  
Dimas Anton Asfani S.T., M.T., PhD

DEPARTMENT OF ELECTRICAL ENGINEERING  
Faculty of Electrical Technology  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember  
Surabaya 2018



**IDENTIFIKASI KERUSAKAN HUBUNG SINGKAT FASA KE  
TANAH PADA MOTOR BLDC MENGGUNAKAN METODE  
EAR**

**TUGAS AKHIR**

**Diajukan Guna Memenuhi Sebagian Persyaratan  
Untuk Memperoleh Gelar Sarjana Teknik**

**Pada**

**Bidang Studi Teknik Sistem Tenaga  
Departemen Teknik Elektro  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember**

**Menyetujui :**

**Dosen Pembimbing I**

**Dosen Pembimbing II**

**Dr. Eng. I Made Yulistya Negara S.P., M.Sc**

**Dimas Anton Asfani S.T., M.T., PhD**

**NIP. 197311192000031001**

**NIP. 198109052005011002**



**SURABAYA  
JULI, 2018**

*Halaman ini sengaja dikosongkan*

## **PERNYATAAN KEASLIAN TUGAS AKHIR**

Dengan ini saya menyatakan bahwa isi keseluruhan Tugas akhir saya dengan judul “**Identifikasi Kerusakan Hubung Singkat Fasa ke Tanah pada Motor BLDC Menggunakan Metode EAR**” adalah benar-benar hasil karya intelektual mandiri, diselesaikan tanpa menggunakan bahan-bahan yang tidak diijinkan dan bukan merupakan karya pihak lain yang saya akui sebagai karya sendiri.

Semua referensi yang dikutip maupun dirujuk telah ditulis secara lengkap pada daftar pustaka.

Apabila ternyata pernyataan ini tidak benar, saya bersedia menerima sanksi sesuai peraturan yang berlaku.

Surabaya, Juli 2018

Achmad Irmawanto Shodek  
07111440000056

*Halaman ini sengaja dikosongkan*



# IDENTIFIKASI KERUSAKAN HUBUNG SINGKAT FASA KE TANAH PADA MOTOR BLDC MENGGUNAKAN METODE EAR

Nama mahasiswa : Achmad Irmawanto Shodek  
Dosen Pembimbing I : Dr. Eng. I Made Yulistya Negara S.T., M.Sc  
Dosen Pembimbing II : Dimas Anton Asfani S.T., M.T., PhD

## ABSTRAK

Perkembangan motor listrik telah menjadi salah satu bagian penting dalam industri mekatronik. Memiliki daya yang besar, efisiensi yang tinggi, range kecepatan yang besar dengan daya yang konstan, torsi yang besar, momen inersia yang kecil, tangguh, pengaturan yang presisi dan biaya produksi yang sebanding dengan keandalannya adalah keuntungan dari brushless motor DC (BLDC) yang banyak digunakan dalam industri mekatronik. Deteksi kerusakan bisa membantu mencegah kerusakan dan juga dapat membantu meningkatkan keandalan sistem serta keselamatan operasional.

Dengan menggunakan peralatan deteksi kerusakan pada motor BLDC diharapkan dapat diketahui kondisi dan tindakan lanjut terhadap motor. Peralatan deteksi didesain untuk dapat menghasilkan tegangan surja. Tegangan surja dihasilkan dari rangkaian *walton cockroft* yang disimpan dalam kapasitor. Kemudian belitan motor BLDC akan dihubungkan dengan tegangan yang tersimpan dalam kapasitor yang akan dilihat gelombang surjanya menggunakan program LabVIEW. Gelombang surja yang dihasilkan selanjutnya akan dibandingkan dan dianalisa menggunakan metode EAR (*Error Area Ratio*). Metode ini digunakan karena sangat sensitif dan akurat dalam membandingkan dua gelombang. Metode EAR akan menghasilkan nilai *threshold* sebagai acuan dalam mendiagnosa kerusakan motor BLDC. Jika nilai EAR kurang dari 10% maka motor di diagnosis dalam keadaan normal. Sebaliknya jika nilai EAR 10% lebih dari 10% maka motor BLDC di diagnosis mengalami gangguan akibat adanya hubung singkat fasa ke tanah sesuai dengan kriteria *test-reff* EAR hasil pengujian. Nilai *test-reff* EAR maksimal pada fasa A, fasa B, dan Fasa C berturut-turut adalah 118.14%, 72.59%, dan 70.93 %.

**Kata kunci:** (*Pengujian surja, EAR (Error Area Ratio), fasa ke tanah, motor BLDC*)

*Halaman ini sengaja dikosongkan*

## **FAULT IDENTIFICATION OF PHASE GROUND SHORT CIRCUIT OF BLDC MOTOR USING EAR METHODS**

Student Name : Achmad Irmawanto Shodek  
Supervisor I : Dr. Eng. I Made Yulistya Negara S.T., M.Sc  
Supervisor II : Dimas Anton Asfani S.T., M.T., PhD

### **ABSTRACT**

*Electric motors have become an essential part of the most Mechatronics system. Higher power density, high efficiency, wide speed range with constant power, high torque, low inertia moment, adjustable speed and higher Torque –weight ratio are the advantages that make the Brushless DC motors (BLDC) widely used in industrial mechatronics applications. Fault detection on BLDC motor can help prevent damage and improve system reliability and operational safety.*

*By using fault detection equipment on BLDC motor is expected to know condition and further action to motor. The detection equipment is designed to produce surge voltage. Surge voltage is generated from the walton cockroft circuit stored in the capacitor. Then the winding of the BLDC motor will be connected to the voltage stored in the capacitor to be viewed by its surge wave using the LabVIEW program. The resulting surge wave will be compared and analyzed using the EAR (Error Area Ratio) method. This method is used because it is very sensitive and accurate in comparing the two waves. The EAR method will produce a threshold value as a reference in diagnosing BLDC motor damage. If the EAR value is less than 10% then the motor is diagnosed under normal circumstances. Conversely, if the EAR value more than 10%, the BLDC motor is faulted due to phase to ground short circuit. According to the test-reff EAR test maximum EAR test-reff values in phase A, phase B, and Phase C were 118.14%, 72.59%, and 70.93%.*

**Key Word:** (Surge test, Error Area Ratio (EAR), Phase to Ground, BLDC motor)

*Halaman ini sengaja dikosongkan*

## KATA PENGANTAR

Puji Syukur penulis panjatkan kehadirat Allah SWT atas segala Rahmat, Karunia, dan Petunjuk yang telah dilimpahkan-Nya sehingga penulis mampu menyelesaikan tugas akhir dengan judul **“Identifikasi Kerusakan Hubung Singkat Fasa ke Tanah pada Motor BLDC Menggunakan Metode EAR”**.

Tugas Akhir ini disusun sebagai salah satu persyaratan untuk menyelesaikan jenjang pendidikan S1 pada Bidang Studi Teknik Sistem Tenaga, Departemen Teknik Elektro, Fakultas Teknologi Elektro, Institut Teknologi Sepuluh Nopember. Atas selesainya penyusunan tugas akhir ini, penulis mengucapkan terima kasih kepada:

1. Allah SWT atas limpahan rahmat, karunia dan petunjuk-Nya.
2. Ibu dan Bapak penulis atas doa dan cinta yang tak henti pada penulis dalam keadaan apapun. Semoga Allah SWT senantiasa melindungi dan memberi mereka tempat terbaik kelak di surgaNya.
3. Bapak Dr. Eng. I Made Yulistya Negara S.T., M.Sc dan Dimas Anton Asfani S.T., M.T., PhD selaku dosen pembimbing yang telah memberikan arahan, bimbingan dan perhatiannya selama proses penyelesaian tugas akhir ini.
4. Seluruh dosen dan karyawan Departemen Teknik Elektro ITS yang telah memberikan banyak ilmu dan menciptakan suasana belajar yang luar biasa.
5. Teman-teman seperjuangan e54 yang telah menemani dan memberikan dukungan selama masa kuliah sampai penyusunan tugas akhir ini.
6. Teman-teman kos Gebang Wetan No. 21 (GW21) yang telah menemani dan memberikan semangat kepada penulis selama masa perkuliahan sampai penyusunan tugas akhir ini.

Penulis telah berusaha maksimal dalam penyusunan tugas akhir ini. Namun tetap besar harapan penulis untuk menerima saran dan kritik untuk perbaikan dan pengembangan tugas akhir ini. Semoga tugas akhir ini dapat memberikat manfaat yang luas.

Surabaya, 4 Juli 2018

Penulis

*Halaman ini sengaja dikosongkan*

## DAFTAR ISI

PERNYATAAN KEASLIAN TUGAS AKHIR .....	v
ABSTRAK .....	vii
ABSTRACT .....	ix
KATA PENGANTAR .....	xi
DAFTAR ISI .....	xiii
DAFTAR GAMBAR .....	xvii
DAFTAR TABEL.....	xix
BAB 1 PENDAHULUAN .....	xix
1.1    Latar Belakang .....	1
1.2    Permasalahan.....	2
1.3    Tujuan .....	2
1.4    Batasan Masalah.....	2
1.5    Metodologi .....	2
1.6    Sistematika Penulisan .....	3
1.7    Relevansi.....	3
BAB 2 KAJIAN PUSTAKA .....	5
2.1    Motor BLDC .....	5
2.1.1    Jenis Motor BLDC.....	7
2.1.2    Prinsip Kerja Motor BLDC .....	9
2.2    Tes Surja .....	9
2.2.1    Pembangkit tegangan tinggi DC.....	11
2.2.2 <i>Switch</i> penghubung .....	12
2.2.3    Kapasitor tegangan tinggi .....	12
2.3    Kegagalan Isolasi pada Belitan Motor Listrik .....	13
2.4    IEEE 522 dan Rekomendasi Tegangan Pengujian Surja .....	14
2.5    Error Area Ratio (EAR) .....	16
2.6    Kriteria Pass/Fail Surge Test.....	17
BAB 3 PERANCANGAN SISTEM DAN ALAT .....	19

3.1	Konfigurasi Sistem.....	19
3.1.1	Pembangkit Tegangan Tinggi DC.....	20
3.1.2	Kapasitor Tegangan Tinggi .....	20
3.1.3	Switch.....	21
3.1.4	Verivolt Entube DE-HB dan NI 9223 .....	22
3.2	Perancangan <i>Hardware</i> .....	23
3.2.1	Rangkaian Pembangkitan Tegangan Tinggi DC.....	23
3.2.2	Desain Rangkaian Switching .....	26
3.2.3	Rangkaian Kapasitor Surja .....	28
3.2.4	Verivolt Entube DE-HB dan NI 9223 .....	29
3.2.5	Program LabVIEW .....	30
3.2.6	Program pada Arduino .....	31
3.3	Perancangan Perangkat Motor BLDC.....	32
3.3.1	Stator .....	33
3.3.2	Rotor.....	34
3.3.3	Core .....	34
3.3.4	Permanen Magnet.....	34
3.3.5	Hall Sensor.....	34
3.4	Perancangan Skema Pengujian Surja.....	35
BAB 4 DETEKSI KERUSAKAN HUBUNG SINGKAT FASA KE TANAH MOTOR BLDC MENGGUNAKAN METODE EAR .....		49
4.1	Hasil dan analisa pengujian rangkaian <i>Walton cockroft</i> .....	49
4.2	Hasil dan Analisa Pengujian <i>Rise Time</i> Gelombang Surja ...	51
4.3	Hasil dan Analisa Pengujian Nilai Resistansi dan Induktansi .....	53
4.4	Hasil dan Analisa Pengujian Surja pada motor BLDC pada Kondisi Normal .....	54
4.5	Hasil dan Analisa Pengujian Surja pada motor BLDC pada Kondisi <i>Fault</i> Fasa ke Tanah.....	59



4.5.1	<i>Fault</i> Fasa A ke Tanah .....	59
4.5.2	<i>Fault</i> Fasa B ke Tanah .....	61
4.5.3	<i>Fault</i> Fasa C ke Tanah .....	63
BAB 5 KESIMPULAN .....		69
5.1	Kesimpulan .....	69
5.2	Saran .....	70
DAFTAR PUSTAKA .....		71
LAMPIRAN List Program Arduino .....		73
BIODATA PENULIS .....		75

*Halaman ini sengaja dikosongkan*

## DAFTAR GAMBAR

Gambar 2. 1 Struktur Motor BLDC.....	6
Gambar 2. 2 Stator Motor BLDC .....	6
Gambar 2. 3 Blok Diagram Motor BLDC.....	7
Gambar 2. 4 Respon gelombang surja kondisi normal dan <i>Short</i> .....	10
Gambar 2. 5 Rangkaian ekivalen tes surja .....	11
Gambar 2. 6 Rangkaian ekivalen pembangkit tegangan tinggi DC.....	12
Gambar 2. 7 Prinsip kerja <i>Switch penghubung</i> .....	12
Gambar 2. 8 Skema kapasitor surja .....	13
Gambar 2. 10 <i>Hot Spot</i> pada belitan motor BLDC.....	14
Gambar 2. 9 Standar <i>rise time</i> menurut IEEE 522 .....	15
Gambar 3. 1 Blok Diagram Konfigurasi sistem tes surja.....	19
Gambar 3. 2 Implementasi rangkaian <i>Walton cockroft</i> .....	20
Gambar 3. 3 Implementasi kapasitor surja .....	21
Gambar 3. 4 Implementasi rangkaian <i>switching</i> .....	21
Gambar 3. 5 (a) Verivolt Entube DE-HB    (b) NI 9223.....	22
Gambar 3. 6 Konfigurasi Verivolt Entube DE-HB (a) .....	22
Gambar 3. 7 Konfigurasi Verivolt Entube DE-HB (b).....	23
Gambar 3. 8 Konfigurasi Verivolt Entube DE-HB (c) .....	23
Gambar 3. 9 Rangkaian <i>Walton cockroft</i> 4 tingkat.....	25
Gambar 3. 10 Implementasi rangkaian <i>Walton cockroft</i> 4 tingkat .....	25
Gambar 3. 11 (a) <i>switching</i> HV relay (b) <i>Switching</i> IGBT.....	27
Gambar 3. 12 Skema implementasi <i>switching</i> pada modul pengujian .	27
Gambar 3. 13 Implementasi rangkaian <i>switching</i> .....	27
Gambar 3. 14 (a) Rangkaian Kapasitor Surja (b) kapasitor surja.....	28
Gambar 3. 15 Konfigurasi pemasangan <i>hardware</i> pengujian surja.....	29
Gambar 3. 16 Tampilan blok program pada LabVIEW.....	30
Gambar 3. 17 <i>Flowchart</i> progam pada <i>software</i> LabVIEW .....	31
Gambar 3. 18 <i>Flowchart</i> Program Arduino .....	32
Gambar 3. 19 (a) Konfigurasi Belitan (b) Skema Belitan Motor .....	33
Gambar 3. 20 Motor BLDC pengujian surja .....	35
Gambar 3.21 Skema pengujian <i>fault</i> paralel 3 <i>Shunt</i> fasa A.....	36
Gambar 3.22 Skema pengujian <i>fault</i> paralel 5 <i>Shunt</i> fasa A.....	36
Gambar 3.23 Skema pengujian <i>fault</i> paralel 7 <i>Shunt</i> fasa A.....	37
Gambar 3.24 Skema pengujian <i>fault</i> paralel 9 <i>Shunt</i> fasa A.....	37

Gambar 3.25 Skema pengujian <i>fault</i> paralel 11 <i>Shunt</i> fasa A .....	38
Gambar 3.26 Skema pengujian <i>fault</i> paralel 13 <i>Shunt</i> fasa A .....	38
Gambar 3.27 Skema pengujian <i>fault</i> paralel 15 <i>Shunt</i> fasa A .....	39
Gambar 3.28 Skema pengujian <i>fault</i> paralel 3 <i>Shunt</i> fasa B .....	40
Gambar 3.29 Skema pengujian <i>fault</i> paralel 5 <i>Shunt</i> fasa B .....	40
Gambar 3.30 Skema pengujian <i>fault</i> paralel 7 <i>Shunt</i> fasa B .....	41
Gambar 3.31 Skema pengujian <i>fault</i> paralel 9 <i>Shunt</i> fasa B .....	41
Gambar 3.32 Skema pengujian <i>fault</i> paralel 11 <i>Shunt</i> fasa B .....	42
Gambar 3.33 Skema pengujian <i>fault</i> paralel 13 <i>Shunt</i> fasa B .....	42
Gambar 3.34 Skema pengujian <i>fault</i> paralel 15 <i>Shunt</i> fasa B .....	43
Gambar 3.35 Skema pengujian <i>fault</i> paralel 3 <i>Shunt</i> fasa C .....	44
Gambar 3.36 Skema pengujian <i>fault</i> paralel 5 <i>Shunt</i> fasa C .....	44
Gambar 3.37 Skema pengujian <i>fault</i> paralel 7 <i>Shunt</i> fasa C .....	45
Gambar 3.38 Skema pengujian <i>fault</i> paralel 9 <i>Shunt</i> fasa C .....	45
Gambar 3.39 Skema pengujian <i>fault</i> paralel 11 <i>Shunt</i> fasa C .....	46
Gambar 3.40 Skema pengujian <i>fault</i> paralel 13 <i>Shunt</i> fasa C .....	46
Gambar 3.41 Skema pengujian <i>fault</i> paralel 15 <i>Shunt</i> fasa C .....	47
Gambar 4. 1 Rangkaian <i>Walton Cockroft</i> 4 stage.....	49
Gambar 4. 2 Pengukuran tegangan rangkaian <i>Walton Cockroft</i> .....	50
Gambar 4. 3 Grafik perbandingan <i>output</i> pengujian dan perhitungan ...	51
Gambar 4. 4 Standar <i>rise time</i> yang digunakan[9].....	52
Gambar 4. 5 Implementasi Pengujian Surja .....	52
Gambar 4. 6 Perbandingan Frekuensi perhitungan dan pengujian .....	54
Gambar 4. 7 Gelombang surja fasa A kondisi normal.....	55
Gambar 4. 8 EAR fasa A pada kondisi normal .....	55
Gambar 4. 9 Gelombang surja fasa B kondisi normal .....	56
Gambar 4. 10 EAR fasa B pada kondisi normal .....	56

## DAFTAR TABEL

Tabel 2. 1 Standar tegangan pengujian surja[12] .....	16
Tabel 2. 2 Kriteria <i>Pass/Fail</i> .....	18
Tabel 3. 1 Perhitungan tegangan output rangkaian <i>Walton cockroft</i> .....	24
Tabel 4. 1 Hasil pengujian dan perhitungan <i>Walton cockroft</i> .....	50
Tabel 4. 2 Hasil pengujian induktansi (L) dan Resistansi (R).....	53
Tabel 4. 3 Perbandingan Frekuensi Perhitungan dengan Pengujian.....	53
Tabel 4. 4 Standar <i>threshold test-reff</i> EAR pengujian motor BLDC kondisi normal.....	58
Tabel 4. 5 Hasil <i>Test-reff</i> EAR pengujian fasa A-N .....	60
Tabel 4. 6 Hasil <i>Test-reff</i> EAR pengujian fasa B-N.....	62
Tabel 4. 7 Hasil <i>Test-reff</i> EAR pengujian fasa C-N.....	64
Tabel 4. 8 <i>Nilai Threshold Normal Coil</i> .....	65
Tabel 4. 9 Nilai <i>Threshold Fault Coil</i> fasa A-N.....	66
Tabel 4. 10 Nilai <i>Threshold Fault Coil</i> fasa B-N .....	66
Tabel 4.11 Nilai <i>Threshold Fault Coil</i> fasa B-N .....	67

*Halaman ini sengaja dikosongkan*

# **BAB 1**

## **PENDAHULUAN**

### **1.1 Latar Belakang**

Kendaraan listrik menjadi salah satu solusi untuk mengurangi jumlah emisi gas dan pencemaran lingkungan. Salah satu teknologi yang digunakan pada kendaraan listrik adalah motor *brushless* DC (BLDC). Motor BLDC dipilih sebagai media penggerak kendaraan listrik dikarenakan memiliki daya yang besar, efisiensi yang tinggi, *range* kecepatan yang besar dengan daya yang konstan, torsi yang besar, momen inersia yang kecil, tangguh, pengaturan yang presisi dan biaya produksi yang sebanding dengan keandalannya[1]. Kini, perkembangan motor listrik mulai memasuki Indonesia. Hal ini sangat didukung oleh ITS Surabaya dengan meluncurkan hasil penelitian Motor Listrik Garasindo *Electric Scooter* ITS (GESITS). GESITS memiliki desain yang unik, dan memiliki beberapa kelebihan salah satunya teknologi baterai yang dapat dipantau dengan smartphone yang berbasis Android.

Dengan teknologi yang ada pada GESITS, diharapkan dapat membantu permasalahan pemerintah terhadap penghematan energi dan penanggulangan emisi karbon dari kendaraan berbahan bakar fosil. Kerusakan pada kendaraan listrik pada umumnya terjadi pada isolasi belitan stator dan bearing dikarenakan minimnya perawatan dan pengawasan pada motor BLDC. Sebuah kegagalan isolasi antarfasa belitan stator dalam jumlah kecil yang tidak terdeteksi dapat menyebabkan kegagalan lanjutan berupa kegagalan isolasi hubung tanah atau *ground fault* yang mengakibatkan kegagalan motor listrik secara menyeluruh dan lebih fatal[2]. Sehingga pada kendaraan listrik dibutuhkan peralatan diagnosis untuk perawatan dan meningkatkan keandalan motor listrik. Pada umumnya peralatan diagnosis yang ada harganya relatif mahal.

Sehingga untuk mengantisipasi hal tersebut, kami membuat rancangan alat diagnosis motor BLDC pada GESITS menggunakan metode tegangan surja agar biaya perawatan motor listrik dapat dikurangi sehingga terjangkau oleh seluruh lapisan masyarakat. Selain itu, metode *Error Area Ratio* (EAR) digunakan untuk menganalisa hasil dari pengujian surja karena efektif, akurat dan mudah sebagai metode deteksi kerusakannya[3].

## 1.2 Permasalahan

Keandaraan listrik tidak memerlukan pemeliharaan seperti kendaraan yang berbahan bakar fosil. Namun, untuk mengetahui kualitas, keandalan, dan keperluan pemeliharaan motor maka diperlukan peralatan diagnosis. Biaya untuk mendiagnosis motor BLDC sendiri umumnya relatif mahal sehingga pemeliharaan motornya juga akan mahal. Oleh karena itu, kami membuat peralatan diagnosis yang terjangkau oleh masyarakat agar perkembangan teknologi motor listrik semakin mudah.

Dalam melakukan diagnosa juga diperlukan metode yang tepat, efektif, dan mudah untuk menghasilkan data yang akurat dan presisi. Dalam penelitian ini kami menggunakan pengujian surja untuk mengetahui kerusakan fasa ke tanah pada isolasi belitan stator yang kemudian akan dianalisa dengan metode *Error Area Ratio* (EAR).

## 1.3 Tujuan

Penelitian ini bertujuan untuk mendesain peralatan diagnosa kerusakan pada motor BLDC menggunakan pengujian surja dan bagaimana mengidentifikasi kerusakan fasa ke tanah pada motor BLDC dengan metode *Error Area Ratio* (EAR).

## 1.4 Batasan Masalah

Permasalahan yang saya ambil pada penelitian ini membahas bagaimana mengidentifikasi kerusakan akibat adanya hubung singkat fasa ke tanah pada motor BLDC dengan menggunakan peralatan diagnosis yang telah kami buat dengan menggunakan metode *Error Area Ratio* (EAR). Hasil yang ditampilkan pada metode EAR berupa perbandingan keadaan motor BLDC pada kondisi normal dan *fault* akibat adanya hubung singkat fasa ke tanah. Sehingga dalam mediagnosis kerusakan fasa ke tanah pada motor BLDC akan semakin mudah guna diterapkan pada kendaraan listrik GESITS.

## 1.5 Metodologi

Pada penelitian ini proses diagnosis kerusakan akibat hubung singkat fasa ke tanah dilakukan dengan melakukan uji tegangan impuls yang dialirkan pada belitan motor BLDC sehingga didapatkan data respon yang berbeda pada tiap-tiap kondisi isolasi.

Pembangkit tegangan tinggi DC *Walton cockroft* menghasilkan tegangan impuls yang akan dialirkan pada kapasitor tegangan tinggi[4]. Setelah kapasitor tegangan tinggi terisi penuh, selanjutnya kapasitor dilepas dari rangkaian sumber tegangan tinggi DC dan dihubungkan ke



belitan motor BLDC sehingga muncul tegangan surja impuls[4]. Belitan yang bersifat induktif akan dilewati oleh tegangan surja sehingga akan timbul respon yang berbeda-beda pada tiap keadaan isolasi yang berbeda. Perbandingan respon gelombang surja pada kondisi normal dan kondisi *fault* dibandingkan dengan metode *Error Area Ratio* (EAR) sehingga tingkat kerusakan isolasi yang terjadi akibat adanya hubung singkat fasa ke tanah dapat diketahui.

## 1.6 Sistematika Penulisan

Sistematika penulisan dalam tugas akhir ini terdiri atas lima bab dengan uraian sebagai berikut :

- Bab 1 : Pendahuluan  
Bab ini membahas tentang penjelasan mengenai latar belakang, permasalahan dan batasan masalah, tujuan, metode penelitian, sistematika pembahasan, dan relevansi.
- Bab 2 : Tinjauan Pustaka  
Bab ini membahas mengenai dasar teori yang digunakan untuk menunjang penyusunan tugas akhir ini.
- Bab 3 : Perancangan dan Pemodelan  
Bab ini membahas mengenai perancangan peralatan diagnosa, skema pengujian, metode pengambilan data dan objek yang akan diuji.
- Bab 4 : Simulasi dan Analisis  
Bab ini membahas tentang pendeteksian kerusakan hubung singkat fasa ke tanah pada motor BLDC pada kondisi isolasi yang berbeda-beda yang kemudian akan dianalisa dengan menggunakan metode *Error Area Ratio* (EAR).
- Bab 5 : Penutup  
Bab ini berisi tentang kesimpulan dan saran dari hasil penelitian yang telah dilakukan.

## 1.7 Relevansi

Pada penelitian ini fokus utama yang diteliti adalah bagaimana mengidentifikasi kerusakan isolasi belitan motor BLDC akibat adanya hubung singkat fasa ke tanah. Setelah diketahuinya kerusakan isolasi belitan diharapkan proses pemeliharaan dalam pengembangan kendaraan listrik GESITS akan semakin mudah. Juga diharapkan agar hasil dari

penelitian ini menjadi standarisasi pengujian kerusakan belitan motor listrik pada waktu yang akan datang.

## BAB 2 KAJIAN PUSTAKA

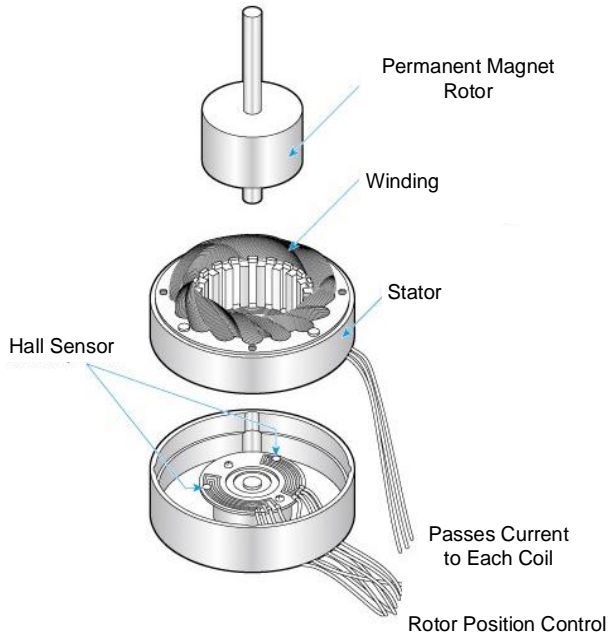
### 2.1 Motor BLDC

*Permanent Magnet Brushless DC Motors* (BLDC) banyak digunakan dalam bidang industri. Konstruksi dari Motor BLDC hampir menyerupai motor AC, disebut juga motor sinkron dengan magnet permanen. Pada motor BLDC, proses komutasi menggunakan peralatan elektronika daya yang dikopel dengan kontroler posisi rotor dari sensor hall [5]. Dibandingkan dengan motor DC dengan sikat yang masih konvensional, BLDC tidak memiliki komutator mekanik yang tahan terhadap keausan pada permukaan dan *arcing* akibat adanya arus yang mengalir pada motor. Magnet yang terdapat pada rotor Motor BLDC menghasilkan medan magnet konstan yang menghasilkan efisiensi dan faktor daya yang tinggi[5].

Rasio torsi yang tinggi pada motor BLDC membuatnya sangat cocok untuk diaplikasikan pada kendaraan elektrik. Dibandingkan dengan motor DC yang lain seperti Motor DC dengan sikat dan motor induksi, motor BLDC memiliki beberapa kelebihan diantaranya; karakteristik kecepatan vs torsi yang lebih baik, efisiensi dan keandalan yang lebih tinggi, *Noise* suara yang lebih kecil, Dimensi yang lebih kecil dan lebih ringan, kecepatan yang lebih besar, Lebih tahan lama[2], [6], [7].

Motor BLDC memiliki banyak kesamaan dengan motor DC tanpa sikat dan motor induksi dalam hal prinsip kerja dan strukturnya. Seperti motor DC yang lain motor BLDC terdiri dari rotor dan stator[5]. Gulungan belitan stator pada motor BLDC dikategorikan menjadi dua, yaitu belitan *wye* (Y) dan delta ( $\Delta$ ). Perbedaan utama antara kedua jenis belitan ini adalah belitan *wye* (Y) menghasilkan torsi yang besar pada kecepatan yang rendah, sementara belitan delta ( $\Delta$ ) menghasilkan torsi yang rendah pada kecepatan yang rendah. Hal tersebut terjadi karena konfigurasi belitan delta ( $\Delta$ ) yang mengakibatkan setengah dari tegangan pada lilitan stator yang tidak terdrive, sehingga kerugian akan meningkat karena menurunnya efisiensi dan torsi pada motor. Rotor pada motor BLDC biasanya terbuat dari magnet permanen. Jumlah kutub pada motor ditentukan berdasarkan aplikasi motor itu sendiri. Semakin banyak jumlah kutub pada motor BLDC tidak akan mengakibatkan torsi semakin baik namun dapat menurunkan kecepatan maksimal dari motor BLDC. Motor BLDC berbeda dengan motor AC sinkron dimana pada bagian deteksi posisi rotor (*magnetic poles*) yang digunakan untuk menghasilkan

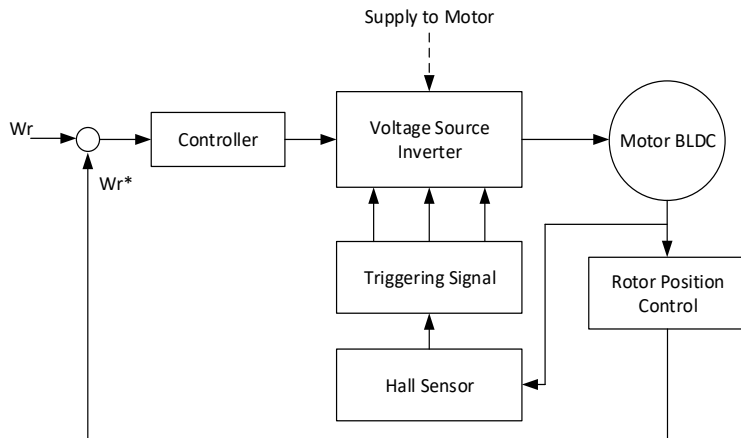
sinyal kontrol pada *switch* elektrik dengan menggunakan sensor optik sebagai sensor posisi rotor. Struktur dari motor BLDC dapat dilihat pada gambar dibawah ini.



**Gambar 2. 1** Struktur Motor BLDC[5]



**Gambar 2. 2** Stator Motor BLDC



**Gambar 2. 3** Blok Diagram Motor BLDC

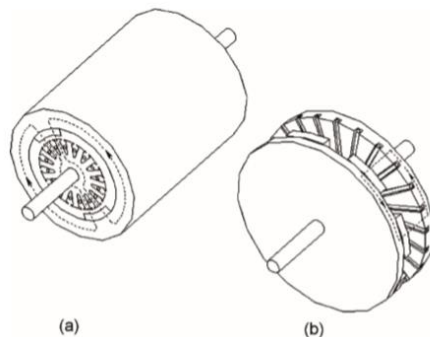
Gambar 2.1 dan 2.2 merupakan salah satu jenis motor BLDC dengan tipe *radial flux*. Pada tipe *radial flux permanent magnet* memiliki cakram berkapasitas tinggi, kerapatan daya yang besar dan torsi yang tinggi. Perbedaan dari kedua gambar tersebut terletak pada jenis belitan yang digunakan. Pada gambar 2.1 belitan menggunakan tipe *distributed winding* sedangkan pada gambar 2.2 menggunakan tipe *concentrated winding*. Perbedaan dari kedua jenis lilitan ini adalah pada tipe *concentrated winding* memiliki kerugian *cooper* dan inti yang lebih sedikit, tapi memiliki rugi arus *eddy* yang lebih besar. Sehingga, untuk aplikasi kendaraan listrik yang membutuhkan kecepatan besar yang konstan digunakan belitan dengan tipe *distributed winding* agar rotor dari motor BLDC tidak mudah panas akibat adanya arus *eddy*.

### 2.1.1 Jenis Motor BLDC

Pada Motor BLDC terdapat dua tipe permanen magnet yaitu, tipe *axial flux* dan *radial flux*. Pada dasarnya konstruksi motor BLDC *axial flux* memiliki kesamaan dengan *radial flux* yang ditandai dengan kesamaan rotor silindris. Dimana penggunaan dua jenis motor tersebut cukup bersaing untuk penerapan pada kendaraan listrik. *Axial flux* memiliki beberapa keunggulan apabila dibandingkan dengan *radial flux*.

Motor BLDC yang menggunakan AFPM (*Axial Flux Permanent Magnet*) dirancang agar dapat digunakan untuk menggantikan RFPM (*Radial Flux Permanent Magnet*). AFPM memiliki bentuk cakram dengan kapasitas tinggi, kerapatan daya yang besar serta torsi yang tinggi. AFPM dikategorikan menjadi dua yaitu, tipe *single ended* dan *double ended*. Dimana *single ended* hanya memiliki satu stator dan satu rotor, sedangkan *double ended* memiliki satu rotor dengan dua stator atau satu stator dengan dua rotor. Konfigurasi terbaik pada AFPM ialah dengan menggunakan tipe *single ended* yang dapat meminimalkan berat, volume, hingga biaya pembuatan sehingga mampu untuk mendapatkan kerapatan daya dan torsi yang maksimal. Disamping itu pembuatan AFPM memiliki proses yang lebih mudah. Pada gambar 2.4 merupakan perbedaan bentuk motor antara RFPM dan AFPM pada motor BLDC. Dimana perbedaan dari keduanya, antara lain :

- Dengan daya *output* yang sama, tipe *axial flux* memiliki berat yang lebih ringan dibandingkan dengan tipe *radial flux*.
- Lifetime* bantalan pada tipe *axial flux* jauh lebih lama dari pada *radial flux* dikarenakan desain tipe *axial flux* memiliki arah aksial terhadap sumbu mesin.
- Dengan dimensi yang sama torsi yang didapatkan pada tipe *axial flux* jauh lebih besar dari pada tipe *radial flux* dikarenakan sistem paralel pada tipe *axial flux*.
- Axial flux* sangat cocok untuk dioperasikan pada frekuensi yang tinggi maupun kecepatan rendah.



**Gambar 2. 4.** Jenis Motor BLDC (a) Radial Flux (b) Axial Flux

### 2.1.2 Prinsip Kerja Motor BLDC

Prinsip kerja dari *axial flux permanent magnet* motor BLDC merupakan teori medan magnet, yaitu saat kutub utara dengan kutub selatan menghasilkan medannya masing-masing maka akan saling tolak menolak dengan kutub sejenis. Dan berlaku pula sebaliknya, dimana kutub yang tidak sejenis akan saling tarik menarik. Sehingga hal inilah yang menimbulkan arus listrik pada kumparan.

### 2.2 Tes Surja

Tes surja adalah tes *offline* yang sudah sangat umum digunakan untuk mengetahui kekuatan isolasi *turn-turn* pada belitan stator pada motor induksi maupun trafo. Tes surja juga dapat dilakukan pada motor BLDC karena pada motor BLDC terdapat konduktor yang berbentuk lilitan (gulungan) pada statornya[6][8]. Tes surja umumnya dilakukan untuk mengetahui; tegangan impuls pada belitan stator pada motor BLDC, kondisi yang memengaruhi level tegangan pada belitan, peralatan yang direkomendasikan untuk mengukur tegangan surja yang valid, penentuan dimana titik yang tepat untuk pengujian surja, tingkat pengujian surja pada berbagai jenis mesin listrik[9]. Keunggulan tes surja yaitu sensitif terhadap perubahan nilai induktansi akibat kerusakan belitan akibat kerusakan *turn-to-turn*, *shunt*, maupun fasa ke fasa akibat kerusakan hubung singkat dengan sangat baik[10].

Pengujian surja dilakukan dengan mengalirkan arus pada suatu belitan dengan sangat cepat sehingga timbul tegangan pada belitan sesuai dengan prinsip induksi pada belitan. Nilai dari induksi pada belitan stator pada motor BLDC dapat dihitung dengan menggunakan persamaan dibawah ini.

$$V = L \frac{di}{dt} \quad (2.1)$$

Dimana :

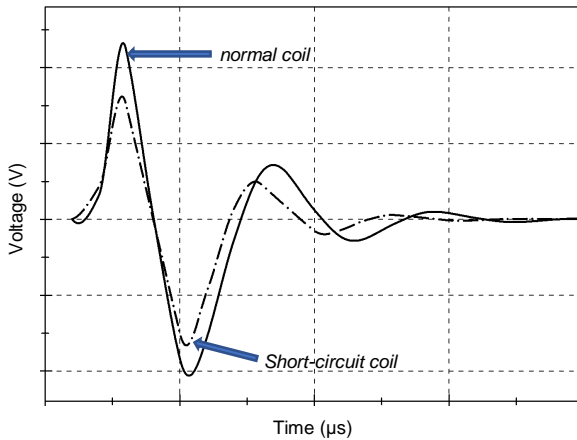
V : Tegangan terminal pada belitan

L : Induktansi pada belitan

Tegangan terminal adalah tegangan total yang timbul akibat adanya induktansi pada belitan. Apabila tegangan induksi lebih besar dari kekuatan isolasi pada belitan, maka akan timbul percikan pada atau

lompatan bunga api pada belitan. Peralatan deteksi kerusakan didesain agar dapat mengetahui kerusakan belitan akibat adanya gangguan fasa ke tanah[11].

Prinsip tes surja yaitu belitan stator dihubungkan dengan kapasitor yang telah terisi muatan dengan level tegangan tertentu pada saat terjadi *discharge* pada kapasitor. Respon tegangan pada kondisi normal dan akibat adanya hubung singkat yang terjadi pada belitan motor dapat diketahui dengan melihat perubahan respon frekuensi saat proses *discharge*[9]. Dibawah ini adalah respon gelombang surja pada belitan motor pada saat normal dan saat terjadi hubung singkat.



**Gambar 2. 5** Respon gelombang surja pada kondisi normal dan pada saat terjadi hubung singkat

Frekuensi osilasi pada belitan motor pada saat timbulnya tegangan surja dapat dihitung dengan persamaan dibawah ini[9].

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{1}{LC} - \frac{R^2}{4L^2}} \quad (2.2)$$

Dimana :

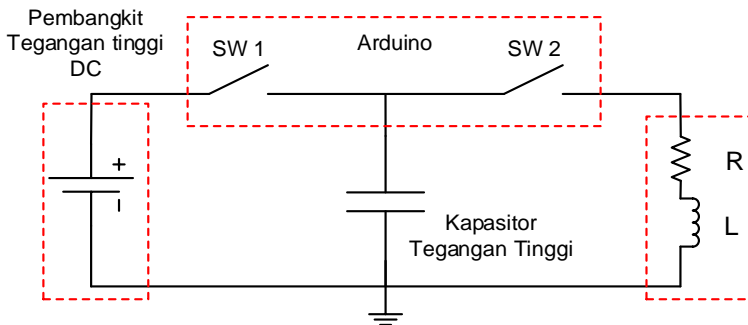
- $f$  : Frekuensi isolasi
- $L$  : Induktansi belitan



$C$  : Kapasitansi kapasitor surja  
 $R$  : Resistansi total rangkaian

Dari persamaan diatas dapat diketahui jika isolasi belitan rusak, maka menyebabkan induktansi belitan menurun, sehingga frekuensi isolasi akan bertambah yang dapat mengindikasikan terjadi hubung singkat.

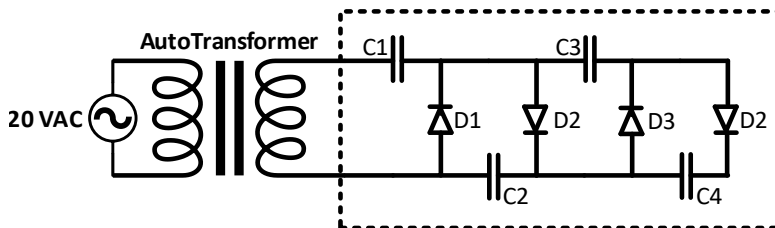
Tes surja terdiri dari beberapa bagian yaitu, pembangkit tegangan DC , *switch* penghubung, kapasitor tegangan tinggi, kontroler dan *oscilloscope* yang digambarkan pada rangkaian ekivalen dibawah ini.



**Gambar 2. 6** Rangkaian ekivalen tes surja

### 2.2.1 Pembangkit tegangan tinggi DC

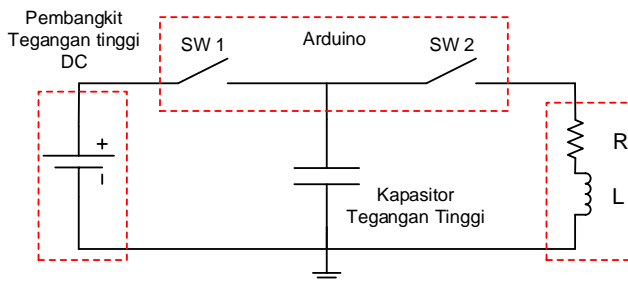
Pada bagian pembangkitan tegangan tinggi DC nilai tegangan dapat dapat dikonversi menjadi 4-6 kali tegangan nominal dengan cara merubah tegangan AC 220 V menjadi tegangan DC dengan menggunakan rangkaian pengali tegangan *Walton cockroft* 4 tingkat[4]. Pengaturan *input* tegangan AC 220 V diatur dengan menggunakan variabel tranformator sehingga akan didapat *output* tegangan DC yang dapat digunakan untuk melakukan tegangan surja pada berbagai macam kondisi. Dibawah ini adalah rangkaian pembangkitan tegangan tinggi DC dengan menggunakan rangkaian pengali tegangan *Walton cockroft* 4 tingkat.



**Gambar 2. 7** Rangkaian ekivalen pembangkit tegangan tinggi DC

### 2.2.2 Switch penghubung

*Switch* penghubung digunakan untuk mengontrol tegangan yang masuk dan keluar dari kapasitor tegangan tinggi. *Switch* penghubung yang digunakan adalah *switch* elektrik dengan jenis *Insulated Gate Bipolar Transistor* (IGBT) yang memiliki *rating* tegangan hingga beberapa ribu Volt. Selain memiliki *rating* tegangan yang tinggi *switch* jenis ini juga memiliki waktu *switching* yang lebih presisi jika dibandingkan dengan relay elektromekanik biasa. *Swith* penghubung ini dikontrol dengan menggunakan *software* Arduino.

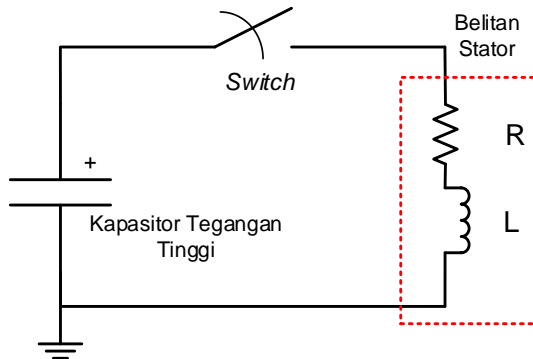


**Gambar 2. 8** Prinsip kerja *Switch* penghubung

### 2.2.3 Kapasitor tegangan tinggi

Kapasitor tegangan tinggi yang digunakan untuk melakukan pengujian surja harus memiliki *rating* tegangan yang tinggi karena tegangan yang timbul dapat mencapai ribuan volt. Kapasitor di *charge* dengan menggunakan tegangan DC yang dibangkitkan oleh pembangkit tegangan tinggi DC hingga penuh, setelah itu dihubungkan dengan belitan stator yang akan diuji sesuai dengan skema pengujiannya. Dengan

seketika maka, *switch* akan diaktifkan sehingga terjadi proses *discharge* pada kapasitor. Kemudian arus akan mengalir dari kapasitor ke belitan sehingga akan membentuk sinyal transient sinus yang akan semakin berisolasi semakin kecil siring bertambahnya waktu.

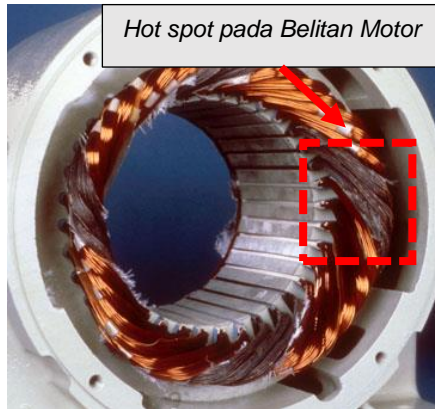


**Gambar 2. 9** Skema kapasitor surja

### 2.3 Kegagalan Isolasi pada Belitan Motor Listrik

Kegagalan Isolasi pada belitan motor listrik merupakan salah satu kerusakan paling umum yang dapat dengan cepat mengakibatkan motor bekerja secara anomali, dan membahayakan struktur motor listrik. Kerusakan biasanya diawali dengan penurunan nilai isolasi pada dua *turn* yang saling berdekatan pada belitan motor[13]. Kerusakan pada isolasi dikarenakan adanya kontaminasi, arus yang berlebihan pada belitan, kerusakan mekanik, suhu, dan tekanan. Kerusakan kemudian menyebar ke arah heliks dan aksial menuju bagian terlemah pada motor. Jika tidak segera terdeteksi, maka kerusakan isolasi dapat menyebabkan kerusakan fatal yaitu kerusakan hubung singkat fasa ke tanah atau fasa ke fasa.

Kegagalan isolasi antar belitan umumnya ditandai dengan munculnya *hot spot* (luka bakar) pada belitan. Dibawah ini adalah contoh gambar kegagalan isolasi antar belitan yang ditandai dengan munculnya *hot spot*.

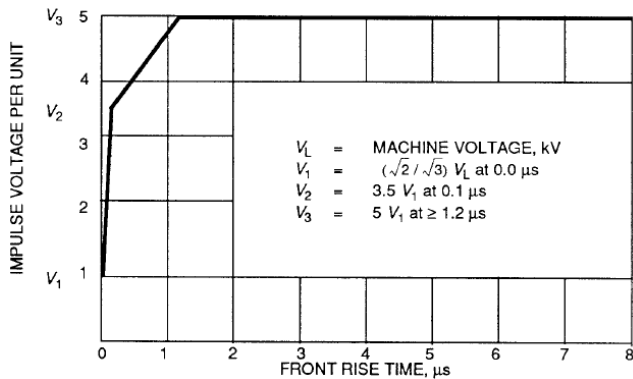


**Gambar 2. 10** *Hot Spot* pada belitan motor BLDC

#### **2.4 IEEE 522 dan Rekomendasi Tegangan Pengujian Surja**

Tingkat pengujian surja dapat dilakukan pada kondisi tegangan impuls yang normal bukan karena tegangan impuls abnormal. Pengujian surja dapat dilakukan untuk kondisi; belitan stator masih dalam kondisi baru, belitan stator dalam kondisi luka total, belitan yang digunakan pada motor bekas, dan belitan yang digunakan untuk keperluan pemeliharaan [9].

*Rise time* tegangan surja yang sangat cepat dapat membuat belitan menginduktansi tegangan dari belitan pertama hingga pada akhir belitan. Hal ini menyebabkan timbulnya frekuensi yang cukup tinggi saat tegangan surja melalui belitan. Berbagai macam standar tegangan pengujian surja ditetapkan IEEE 522 sesuai dengan *rise time* tegangan surja yang digunakan dan spesifikasi motor yang akan diuji. *Rise time* adalah waktu yang dibutuhkan oleh gelombang surja dari keadaan 30% sampai 90% nilai tegangan dikalikan 1.67[6]. Contoh penentuan *rise time* dapat dilihat pada gambar dibawah ini.



**Gambar 2. 11** Standar *rise time* menurut IEEE 522[9]

Berdasarkan IEE522 gelombang dengan *rise time* 0 sampai 100 ns disarankan dengan pengujian dengan nilai tegangan impuls sebesar 3.5 p.u. sedangkan untuk gelombang yang memiliki *rise time* lebih besar dari 1.2  $\mu$ s disarankan untuk menggunakan pengujian dengan nilai tegangan impuls sebesar 5 p.u. Pada pengujian surja perlu diketahui jika terdapat tegangan minimal yang harus melewati sela udara antara belitan sehingga dapat diketahui apakah pada belitan tersebut terdapat kerusakan atau hubung singkat. Untuk menentukan seberapa baiknya tingkat pengujian surja maka perlu diperhatikan parameter-parameter seperti ukuran dan berat belitan, panjang *turn*, pengaturan *turn* pada belitan, tegangan *rating* per *turn* per belitan, sistem tegangan, kapasitansi antar *turn* dan kapasitansi *turn* ke tanah[11].

Tegangan minimal yang dimaksudkan sesuai dengan “*paschen's minimum*” dengan standar tegangan 350 V. Namun, pada kenyataanya perbedaan isolasi belitan membuat hasil pengujian surja menjadi beraneka ragam. Sehingga menurut *Baker Instrument* rekomendasi tegangan yang disarankan adalah sebesar 500 V[12]. Untuk tegangan maksimal yang disarankan untuk pengujian surja *Baker Instrument* juga memberikan standar yang telah diterapkan pada industri seperti EASA dan IEC34-15. Standar tegangan pengujian surja menurut *Baker Instrument* dapat dilihat pada tabel dibawah ini.

**Tabel 2. 1** Standar tegangan pengujian surja[12]

<i>Vline</i>	<i>Per Unit</i>	IEEE 522		EASA
		<i>New Coil</i>	<i>In Service</i>	<i>In Service</i>
		3.5 pu	75% New	2*Vline +1000
480	392	1372	1029	1960
575	469	1643	1232	2150
600	490	1715	1289	2200
2300	1878	6573	4930	5600
4160	3397	11888	8916	9320
6900	5634	19718	14789	14800
13800	11268	39437	29578	28600

## 2.5 Error Area Ratio (EAR)

Metode Error Area Ratio (EAR) digunakan untuk mendeteksi kerusakan *turn* akibat adanya hubung singkat antar *turn* dengan satu atau lebih *turn* belitan yang terhubung singkat. Juga untuk mengetahui penuaan isolasi belitan akibat adanya kerusakan isolasi pada *turn* motor BLDC[12]. Metode EAR digunakan karena sensitif terhadap adanya kerusakan dan mampu mendeteksi perbedaan antara dua gelombang yang hampir tidak terlihat perbedaannya. Untuk mendeteksi dua bentuk gelombang yang berbeda maka EAR dapat ditentukan dengan menggunakan persamaan dibawah ini.

$$EAR = \frac{\sum_{i=1}^N |F_i^{(1)} - F_i^{(2)}|}{\sum_{j=1}^N |F_j^{(1)}|} \times 100 \quad (2.4)$$

Dimana  $F_i^{(1)}$  adalah titik ke-i dari gelombang pertama (gelombang referensi),  $F_i^{(2)}$  adalah titik yang berkorespondensi pada gelombang kedua pada waktu yang sama, dan N adalah jumlah titik dari kedua gelombang surja yang akan dibandingkan. EAR tidak berlaku pada dua gelombang yang identik[6]. Dari persamaan diatas maka dapat dikatakan bahwa EAR merupakan metode yang digunakan untuk membandingkan dua gelombang yang berbeda. Pada pengujian surja EAR digunakan untuk mengamati tegangan surja motor BLDC pada kondisi normal dan pada kondisi hubung singkat. Kedua gelombang diamati dan dilihat besar perbedaannya.

Metode EAR memiliki tiga bagian, yaitu pulse to pulse EAR (P-P EAR), line to line EAR (L-L EAR), dan test-reff EAR[6], [10], [11]. P-P EAR dioperasikan (realtime) pada saat tes surja berlangsung. Metode ini dioperasikan bertahap untuk mencapai tegangan maksimum pengujian. Misalkan pengujian maksimum 1000 V, maka untuk mencapai level tegangan tersebut pengujian dinaikkan secara bertahap dari 0V, 20V, 40V, 80V, 100V, dan seterusnya sampai mencapai 1000V. Kemudian setiap perbedaan *step*nya dianalisa dengan menggunakan metode EAR. Jika nilai EAR melebihi standar maka dapat diindikasikan telah terjadi hubung singkat pada belitan.

L-L EAR menggunakan analisa perbedaan gelombang uji antara dua fasa pada suatu motor. Setiap fasa akan diuji kemudian dibandingkan apakah melebihi standar atau tidak. Jika perbedaan melebihi standar maka dapat disimpulkan pada phasa tersebut terkena gangguan hubung singkat. Pengujian ini cocok dilakukan pada rentang tegangan surja 500V sampai 30 KV[12]. Parameter yang mempengaruhi hasil tes surja dengan menggunakan metode ini antara lain; posisi motor, kondisi rotor, koneksi motor, konfigurasi belitan, iron saturation, dan laminasi besi.

Sedangkan untuk *test-reff* EAR dapat digunakan pada lebih banyak objek dikarenakan mengandalkan referensi yang dibandingkan dengan hasil pengujian motor lain. Sehingga motor yang memiliki spek yang sama dapat diuji dengan banyak kondisi. Perbedaan EAR pada saat referensi dan pengujian motor akan dibandingkan apakah melebihi batas atau tidak, jika melebihi batas maka motor dapat dikatakan mengalami kegagalan isoalasinya.

## 2.6 Kriteria Pass/Fail Surge Test

Kriteria *pass/fail* menentukan apakah setelah pengujian motor BLDC dapat dikatakan mengalami kerusakan atau tidak dari hasil nilai EAR pada pengujian surja. Baker memberikan rekomendasi nilai kriteria *Pass/Fail* pada pengujian surja yang digunakan pada produk-produk Baker yang telah dijual di pasaran[12]. Dalam hal ini, kriteria *Pass/Fail* meliputi P-P EAR, L-L EAR, *Test-Reff* EAR dan *Zero Crossing*. Namun dalam penelitian ini dilihat kriteria *Pass/Fail* dari L-L EAR dan *Test-Reff* EAR.

**Tabel 2. 2** Kriteria *Pass/Fail*

	L-L EAR	P-P EAR	Test-Reff EAR	Zero Crossing
<i>Manufacturing</i>	5-15% - <i>No Rotor Installed</i>	5-15%	5-15%	5-20%
<i>Rotor Installed</i>	15-65%	5-15%	10-25% <i>or</i> <i>Higher</i>	10-25% <i>or</i> <i>Higher</i>

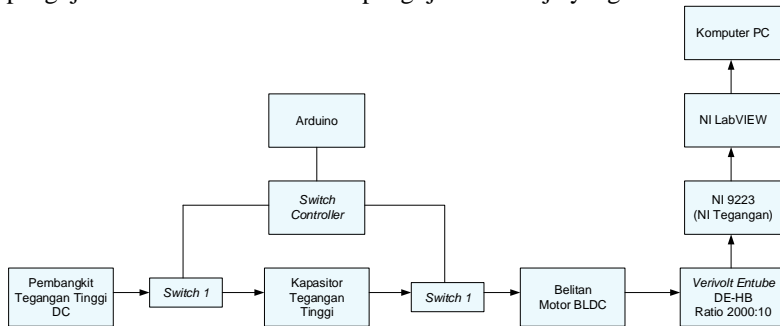
Dari kriteria diatas, nilai kriteria yang digunakan pada peneltiian ini menggunakan *manufacturing* dengan *No rotor installed*. Kriteria yang digunakan pada penelitian kali ini adalah untuk L-L EAR menggunakan 15%, dan untuk Test-Reff EAR menggunakan 10%. Nilai tersebut memiliki maksud jika nilai EAR pana Motor BLDC hasil tes surja melebihi nilai kriteria *Pass/Fail* yang digunakan, maka Motor BLDC tersebut *Fail* dan dapat dikategorikan terdapat kerusakan.



## BAB 3 PERANCANGAN SISTEM DAN ALAT

### 3.1 Konfigurasi Sistem

Pengujian menggunakan tegangan impuls surja dilakukan dengan beberapa hal berikut yaitu; desain peralatan tes surja, skema pengujian kerusakan belitan motor BLDC akibat hubung singkat fasa ke tanah, proses akuisisi data menggunakan *software* untuk analisa hasil pengujian. Berikut adalah skema pengujian tes surja yang telah dibuat.



**Gambar 3. 1** Blok Diagram Konfigurasi sistem tes surja

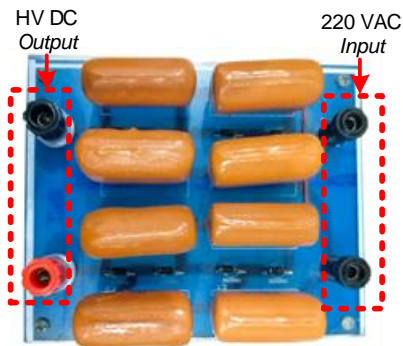
Pengujian surja diawali dengan pembangkitan tegangan tinggi DC sesuai standar pengujian tegangan surja yang diijinkan. Setelah didapatkan tegangan surja yang sesuai dengan standar yang diijinkan, maka dilakukan proses pengisian kapasitor surja (*charging*). Proses pengisian kapasitor surja dilakukan dengan menggunakan arduino yang akan mengaktifkan relay tegangan tinggi (*switch 1*). Proses pengisian kapasitor surja ini dilakukan kurang lebih selama 4 detik.

Sesaat setelah proses pengisian selesai, maka relay tegangan tinggi dibuka dan seketika itu juga maka *switch 2* (IGBT) dihubungkan dengan belitan motor BLDC sesuai dengan skema pangujian yang akan dilakukan. Muatan kapasitor yang mengalir ke belitan motor BLDC membentuk gelombang surja yang akan direkam dengan menggunakan *software* LABVIEW dalam bentuk gelombang surja. Gelombang surja yang didapat berupa X dan Y axis yang nantinya akan diolah melalui aplikasi *microsoft excel* untuk mengetahui nilai *Error Area Ratio* (EAR) nya. Pengujian menggunakan tegangan surja pada belitan motor BLDC

dilakukan secara *Off-Line* atau dengan kata lain motor tidak sedang dalam keadaan beroperasi.

### 3.1.1 Pembangkit Tegangan Tinggi DC

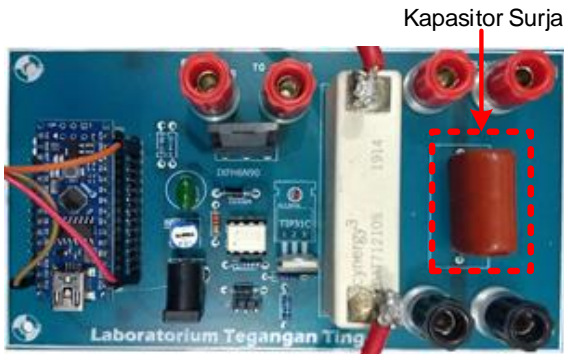
Proses pembangkitan tegangan tinggi DC terdiri atas dua bagian, yaitu variabel transformator dan rangkaian *Walton cockroft*. *Variable transformer* berfungsi sebagai pengatur besar kecil nya tegangan *output* dari rangkaian pengali tegangan *Walton cockroft*. Sedangkan rangkaian *Walton cockroft* digunakan sebagai pembangkit tegangan tinggi DC karena dapat mengalikan tegangan *input* sebesar besarnya tingkatan dari rangkaianannya. Setelah dilakukan pembangkitan tegangan tinggi DC maka *output* tegangan surja akan disalurkan ke kapasitor tegangan tinggi yang terhubung dengan *switch* 1.



Gambar 3. 2 Implementasi rangkaian *Walton cockroft*

### 3.1.2 Kapasitor Tegangan Tinggi

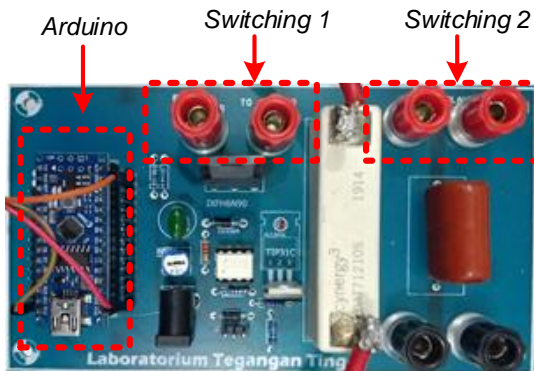
Kapasitor ini digunakan untuk menyimpan muatan surja. Proses pengujian surja dapat dilakukan ketika kapasitor dapat mengalirkan muatan surja ke belitan motor BLDC sesuai dengan skema pengujiannya. Muatan surja dapat dialirkan jika *switch* penghubung dari kapasitor tegangan tinggi ke belitan motor BLDC sedang beroperasi.



**Gambar 3. 3** Implementasi kapasitor surja

### 3.1.3 Switch

Agar kapasitor tegangan tinggi terhubung dengan pembangkit tegangan tinggi DC dan kapasitor tegangan tinggi terhubung dengan lilitan motor BLDC maka diperlukan komponen *switch*. Ada tiga komponen utama dalam melakukan proses *switching*, yaitu *switch*, *switch controller*, dan Arduino. *Switch* akan diatur oleh *switch controller* dengan menggunakan Arduino sebagai *programmable interface* nya sehingga dapat berfungsi sesuai dengan skema yang akan diujikan.



**Gambar 3. 4** Implementasi rangkaian *switching*

### 3.1.4 Verivolt Entube DE-HB dan NI 9223

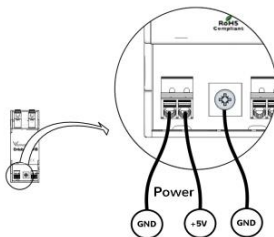
NI 9223 adalah produk dari *National Instruments* yang merupakan *compact DAQ (cDAQ)* atau *analogue input module* yang digunakan sebagai akuisisi data. NI 9223 digunakan untuk merekam tegangan surja sehingga dapat disinkronisasikan dengan sensor gelombang yang terekam oleh Verivolt Entube DE-HB. NI 9223 dalam eksperimen ini dihubungkan ke PC dengan menjalankan program LabVIEW, dilengkapi dengan 4 input analog, dengan *sample rate* sebesar 1 MHz. NI 9223 dan Verivolt Entube DE-HB ditunjukkan oleh Gambar dibawah ini.



**Gambar 3. 5** (a) Verivolt Entube DE-HB[14]    (b) NI 9223[15]

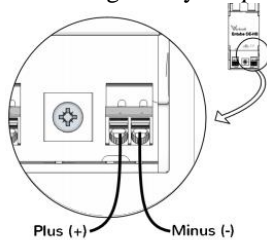
Konfigurasi *hardware* pada Verivolt Entube DE-HB:

- a. Sensor *ground* dihubungkan dengan kabel pentanahan. Disebelah kiri dari sensor *ground* terdapat dua konektor sumber yang terdiri dari konektor *ground* dan *inputan* sumber. Selanjutnya dihubungkan dengan sumber eksternal sebesar 5V.



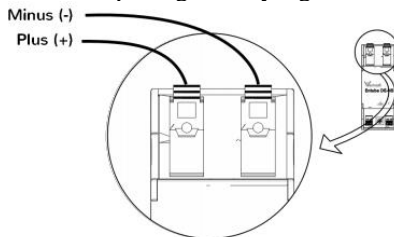
**Gambar 3. 6** Konfigurasi Verivolt Entube DE-HB (a)

- b. Masukkan sepasang kabel pada masing-masing konektor dan sesuai dengan *input* arus pada DAQ. Polaritas dari sinyal keluaran harus sesuai dengan sinyal *input*.



**Gambar 3. 7** Konfigurasi Verivolt Entube DE-HB (b)

- c. Pada sisi primer hubungkan kabel sesuai tanda positif dan negatif. Gunakan sepasang kabel yang sesuai standar.



**Gambar 3. 8** Konfigurasi Verivolt Entube DE-HB (c)

### 3.2 Perancangan *Hardware*

*Hardware* yang akan dirancang pada penelitian menggunakan pengujian surja meliputi perancangan rangkaian pembangkitan tegangan tinggi DC dengan menggunakan variabel transformator dan rangkaian *Walton cockroft 4 stage*, rangkaian *switching* dan kontrolernya dengan menggunakan IGBT untuk proses *switching* serta arduino sebagai kontrolernya, dan pembuatan rangkaian kapasitor surja untuk pengisian tegangan yang akan di *switching*, serta skema pengujian kerusakan isolasi belitan motor BLDC akibat adanya hubung singkat fasa ke tanah.

#### 3.2.1 Rangkaian Pembangkitan Tegangan Tinggi DC

Proses pembangkitan tegangan tinggi DC dilakukan dengan menggunakan rangkaian *Walton cockroft 4 stage*. Untuk melakukan pengujian surja tegangan yang dianjurkan harus berbeda-beda agar

diketahui perbandingan pengujian pada tiap-tiap tegangannya. Agar terbentuk tegangan surja yang berbeda-beda maka pada rangkaian *Walton cockroft 4 stage* dihubungkan dengan variabel transformator. Input AC 220 vakan dinaik-turunkan sesuai dengan variasi input yang diinginkan.

Pada rangkaian *Walton cockroft 4 stage* terdapat dua komponen utama yaitu 2 buah dioda dan 2 buah kapasitor pada tiap-tiap tingkat. 4 tingkatan rangkaian *Walton cockroft* dipilih agar pada tegangan *output* memiliki range yang lebih tinggi sehingga pengujian surja dapat dilakukan pada tingkatan tegangan yang tinggi.

Perhitungan tegangan *output* pada rangkaian *Walton cockroft* dapat dihitung dengan menggunakan rumus seperti berikut ini:

$$V_{out} = n . 2 . \sqrt{2} . V_{eff} \quad (3.1)$$

Dengan :

$V_{out}$  : Tegangan *output* (V)

$n$  : Jumlah *stage*

$V_{eff}$  : Tegangan efektif *Input* AC (V)

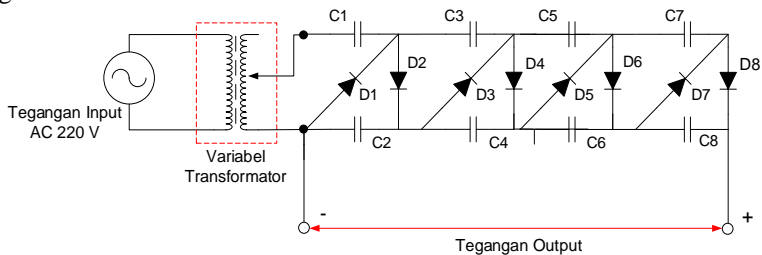
Dengan menggunakan persamaan tegangan tersebut maka dapat dihitung tegangan *output* pada tiap-tiap *stage* sesuai  $V_{eff}$  yang diinginkan sesuai dengan variabel tranformator dari 0-110V yang ditampilkan pada tabel dibawah ini. Dari hasil perhitungan tegangan *output* pada tiap-tiap *stage* maka tegangan pada *stage 4* dipilih karena menghasilkan tegangan yang melebihi 1000 V dengan input yang masih dapat disesuaikan oleh transformator variabel. Rangkaian *Walton cockroft 4* tingkat ditunjukkan pada gambar dibawah ini.

**Tabel 3. 1** Perhitungan tegangan *output* rangkaian *Walton cockroft*

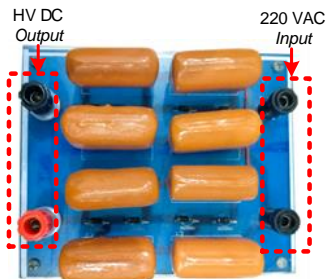
Tegangan Input AC (Volt)	Stage 1 (Volt)	Stage 2 (Volt)	Stage 3 (Volt)	Stage 4 (Volt)
0	0	0	0	0
20	56,57	113,14	169,71	226,27
40	113,14	226,27	339,41	452,55
60	169,71	339,41	509,12	678,82
80	226,27	452,55	678,82	905,10

Tegangan Input AC (Volt)	Stage 1 (Volt)	Stage 2 (Volt)	Stage 3 (Volt)	Stage 4 (Volt)
100	282,84	565,69	848,53	1131,37
120	339,41	678,82	1018,23	1357,65
140	395,98	791,96	1187,94	1583,92
160	452,55	905,10	1357,65	1810,19
180	509,12	1018,23	1527,35	2036,47
200	565,69	1131,37	1697,06	2262,74
220	622,25	1244,51	1866,76	2489,02

Dari hasil perhitungan tegangan *output* pada tiap-tiap *stage* maka tegangan pada *stage 4* dipilih karena menghasilkan tegangan yang melebihi 1000 V dengan input yang masih dapat disesuaikan oleh variabel transformator. Rangkaian *Walton cockroft* 4 tingkat ditunjukkan pada gambar dibawah ini.



**Gambar 3. 9** Rangkaian *Walton cockroft* 4 tingkat



**Gambar 3. 10** Implementasi rangkaian *Walton cockroft* 4 tingkat

Untuk kapasitor yang akan dipergunakan dapat dihitung dengan menggunakan rumus :

$$V = \frac{q}{C} \quad (3.2)$$

Dengan :

V : Tegangan Kapasitor (V)

q : Muatan kapasitor (C)

C : Kapasitansi (nF)

Perhitungan kapasitor akan menentukan seberapa besar tegangan maksimal yang mampu ditahan, oleh karena itu dalam memilih kapasitor sebaiknya dipilih kapasitor dengan kapasitas yang cukup besar. Penggunaan 8 buah dioda dan kapasitor dengan rating tegangan 2000V bertujuan untuk mengantisipasi tegangan *output* yang lebih besar dari 1000V. Sementara pemilihan kapasitor dengan kapasitas yang tinggi bertujuan untuk mampu membangkitkan tegangan tinggi DC yang sesuai.

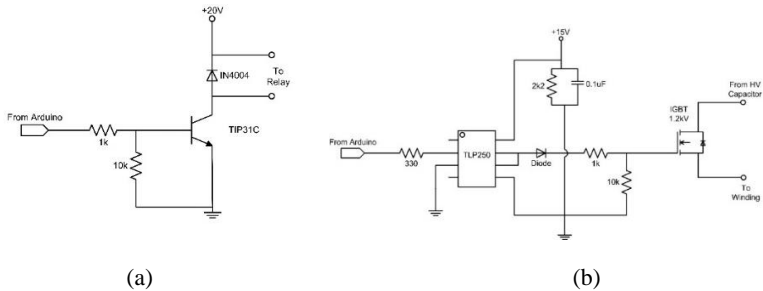
### 3.2.2 Desain Rangkaian Switching

Untuk mengisi (*charge*) dan melepas (*discharge*) muatan pada kapasitor tegangan tinggi maka diperlukan rangkaian *switching*. Rangkaian ini terdiri dari dua buah saklar yang dipasang secara paralel dengan kapasitor pada bagian *incoming* dan *outgoing*. Sebagai kontroler elektroniknya digunakan arduino yang telah terhubung dengan komputer. Saat proses pengisian (*charging*) maka *switch* 1 beroperasi hingga tersimpan muatan penuh pada kapasitor tegangan tinggi, sedangkan pada *switch* 2 dalam keadaan open (*OFF*). Setelah kapasitor terisi penuh muatan, maka *switch* 1 open (*OFF*) dan *switch* 2 beroperasi (*ON*) sehingga muatan pada kapasitor tegangan tinggi mengalir ke belitan motor BLDC untuk pengujian surja.

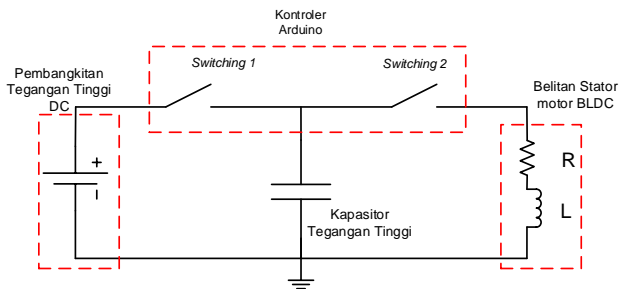
Pemilihan komponen *switching* untuk hasil tegangan surja yang maksimal. Pada *Switching* 1 digunakan relay tegangan tinggi yang mampu mentrigger tegangan 20 V dengan *rating* tegangan sampai dengan 10 kV. Berbeda dengan *switching* 1, pada *switching* 2 digunakan komponen IGBT untuk pelepasan muatan dari kapasitor ke belitan motor BLDC. Komponen IGBT yang digunakan adalah IRGPS60B120KDP dengan *rating* tegangan 1200V. Pemilihan tipe ini dikarenakan *switching* elektrik jenis MOSFET, IGBT, SCR, TRIAC, dan SSRL memiliki transisi yang halus pada proses pelepasan muatan (*discharge*) sehingga tegangan



output akan maksimal. IGBT sendiri dipilih karena memiliki tegangan tembus (*rating*) yang sesuai untuk pengujian surja yaitu sebesar 1,2 kV. Skema dan implementasi rangkaian *switching* ditunjukkan oleh gambar dibawah ini.



**Gambar 3. 11** (a) *switching* HV relay (b) *Switching* IGBT



**Gambar 3. 12** Skema implementasi *switching* pada modul pengujian



**Gambar 3. 13** Implementasi rangkaian *switching*

### 3.2.3 Rangkaian Kapasitor Surja

Kapasitor surja digunakan digunakan untuk membangkitkan (*charging*) dan melepaskan (*discharging*) tegangan surja. Proses pembangkitan tegangan surja dilakukan dengan menggunakan relay tegangan tinggi sedangkan pelepasan muatan tegangan menggunakan IGBT. Pada saat proses pelepasan muatan ke belitan motor BLDC akan dihasilkan respon gelombang surjanya. Rating kapasitor surja yang dipakai untuk pengujian surja ini adalah sekitar 1,6 kV sehingga lebih tinggi dari tegangan standar pengujian surja yaitu sebesar 1 kV.

Pengisian muatan pada kapasitor surja membutuhkan beberapa waktu tertentu sampai kapasitor surja dapat terisi penuh. Perubahan muatan kapasitor terjadi secara eksponensial dengan rumus:

$$V_c = E \left(1 - e^{-\frac{t}{RC}}\right) \quad (3.3)$$

Dengan :

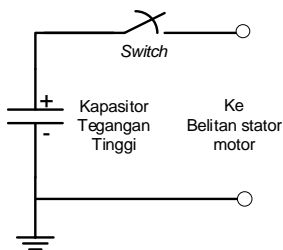
$V_c$  : Tegangan Kapasitor (1V)

$E$  : Tegangan Sumber (1000 V)

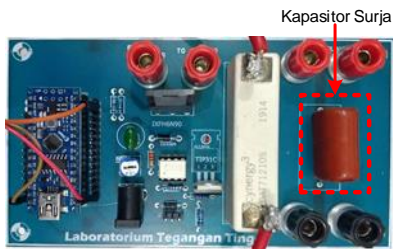
$R$  : Tahanan ( $\Omega$ )

$C$  : Kapasitansi (10nF)

Tegangan awal kapasitor sebesar 1V dihasilkan karena adanya muatan sisa pada kapasitor. Karena pada kenyataannya tidak dipergunakannya resistor, maka pada layout PCB diasumsikan bahwa tahanan kapaitor sebesar 1  $\Omega$ . Maka, sesuai dengan rumus diatas, waktu yang diperlukan oleh kapasitor surja untuk terisi penuh adalah . Untuk keperluan proteksi maka pengisian kapasitor surja dibuat menjadi 5 detik lebih lama.



(a)

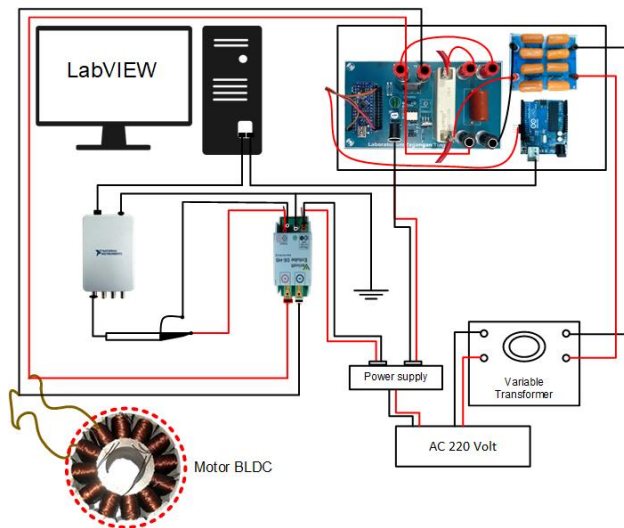


(b)

**Gambar 3. 14** (a) Rangkaian Kapasitor Surja (b) Implementasi kapasitor surja

### 3.2.4 Verivolt Entube DE-HB dan NI 9223

NI 9223 adalah produk dari *National Instruments* yang merupakan Compact DAQ(cDAQ) atau *Analogue Input Module* yang digunakan untuk akuisisi data secara simultan. NI 9223 menghasilkan input analog diferensial yang sangat cocok untuk diterapkan pada pengujian surja. NI 9223 dapat menghasilkan sampel maksimal pada tiap saluran hingga mencapai 1 MS/s. Karena pada NI 9223 input tegangan 10 V maka diperlukan perangkat tegangan yang mampu merekam hingga 1000 V. Sehingga diperlukan perangkat Verivolt Entube DE-HB yang dapat merekam tegangan sehingga sinyal pengujian surja dapat dikur untuk proses pengolahan data. Entube-DE-HB dirancang untuk memungkinkan pengukuran sinyal tegangan tinggi Output dari Entube-DE-HB adalah Penurunan linier tegangan yang diperbesar antara dua terminal inputnya. Output ini kemudian dapat diproses oleh sistem pengukuran berbasis komputer. Sinyal *output* dari Entube DE-HB berupa perbedaan tegangan antara kedua *input*nya, sehingga akan mudah diproses dengan menggunakan komputer sebagai program pengukuran tegangan surjanya. Berikut adalah konfigurasi pemasangan NI 9223 dan Verivolt Entube DE-HB yang terhubung dengan PC dengan program *LabVIEW* sebagai perekam gelombang tegangan surjanya.



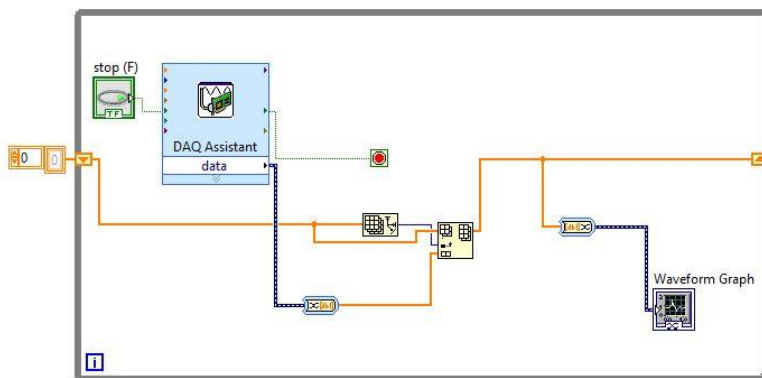
**Gambar 3. 15** Konfigurasi pemasangan *hardware* pengujian surja

Perancangan *software* yang digunakan meliputi perancangan Program dan *Interface* pada komputer. Perancangan *software* disusun dari *Flowchart* dan penyusunan program sesuai alur yang diinginkan. *software* yang mendukung perangkat dalam penelitian ini adalah *software* LabVIEW yang telah disinkronkan dengan fitur DAQ Assist, untuk *human interface* sekaligus sebagai akuisisi data saat proses pengambilan data berlangsung.

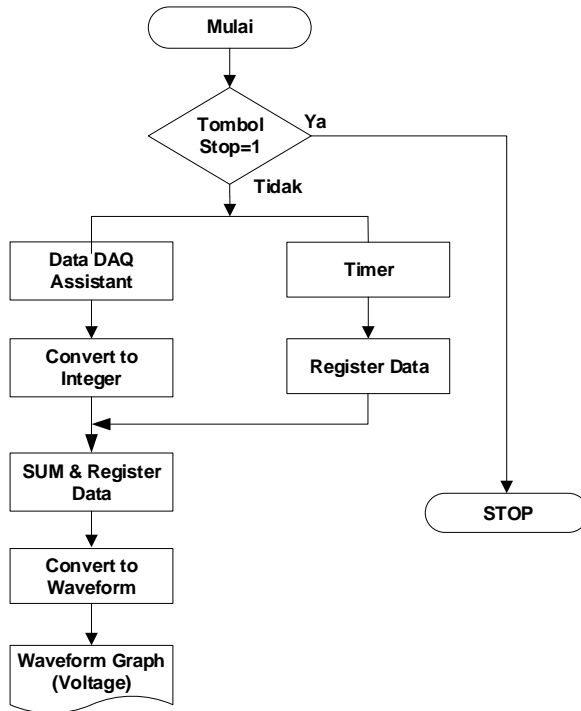
### 3.2.5 Program LabVIEW

Untuk pembacaan tegangan pada perangkat komputer maka diperlukan program *DAQ Assistant* pada program LabVIEW yang telah terintegrasi pada perangkat NI 9223. Data dapat dihasilkan dengan pembacaan nilai *input* pada NI 9223 yang telah dihubungkan dengan objek yang akan diuji. Program pada LabVIEW dibuat dengan kontrol *Start*, *Stop*, dan *display* pada komponen *DAQ Assistant*.

*Interface* yang digunakan pada program LabVIEW untuk pengujian surja dirancang sesederhana mungkin, yang terdiri dari blok program *stop* dan *display*. Tombol *stop* digunakan untuk menghentikan proses pengambilan data. Sedangkan *display* digunakan untuk menampilkan data yang telah dibaca dan disimpan pada RAM. Tampilan program pada LabVIEW dapat dilihat pada gambar dibawah ini.



**Gambar 3. 16** Tampilan blok program pada LabVIEW

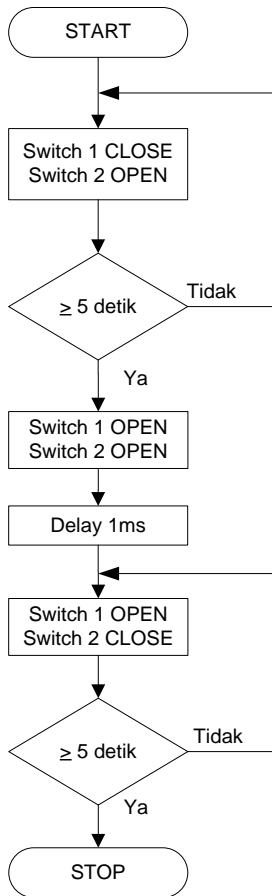


**Gambar 3. 17** Flowchart program pada *software* LabVIEW

### 3.2.6 Program pada Arduino

Selain *software Lab VIEW*, *software* lain yang digunakan adalah Arduino. Arduino digunakan sebagai pengontrol *switching* pada penelitian kali ini. Logika sederhana dari program Arduino yang saya rangkai adalah seperti berikut:

- Pada kondisi awal *Switch* dan *Switch 2* Open
- *Switch 1* close selama 5 detik sehingga kapasitor surja terisi muatan
- Setelah 5 detik, *switch 1* open
- Delay selama 1 ms
- *Switch 2* Close selama 5 detik sehingga muatan pada kapasitor mengalir ke belitan

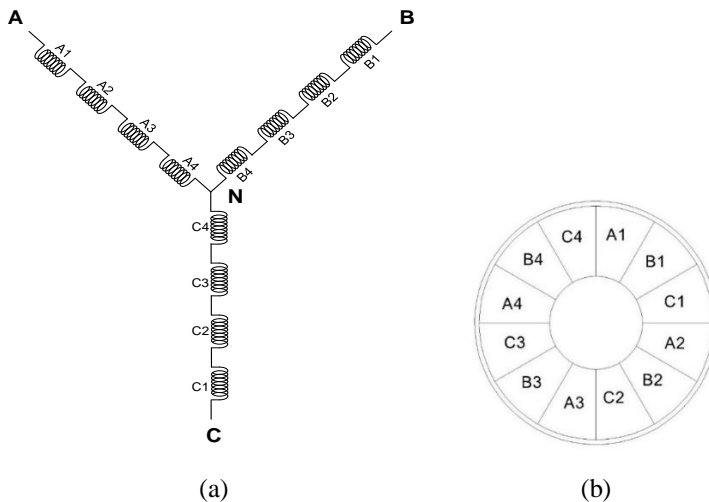


**Gambar 3. 18** Flowchart Program Arduino

### 3.3 Perancangan Perangkat Motor BLDC

Spesifikasi motor BLDC yang digunakan untuk pengujian surja untuk mengetahui kerusakan hubung singkat satu fasa ke tanah adalah sebagai berikut.

- Kawat 0.75 mm<sup>2</sup>
- Paralel 16 Kawat
- 8 Turn Per fasa



**Gambar 3. 19** (a) Konfigurasi Belitan Motor (b) Skema Belitan Motor BLDC

Motor BLDC tersebut akan diuji menggunakan tegangan surja pada keadaan normal untuk mengetahui gelombang referensi yang digunakan sebagai gelombang pembanding dengan gelombang akibat adanya hubung singkat fasa ke tanah. Skema pengujian yang akan dilakukan adalah pengujian *fault* paralel ke netral untuk deteksi gangguan fasa ke tanah pada motor BLDC. Skema tersebut dibuat secara real dengan cara mengambil beberapa kriteria pada belitan dan di *short*-kan dengan urutan skema seperti yang telah dijelaskan. Setelah mengetahui data gelombang referensi dan gelombang *fault* pada tiap fasa, maka dilakukan analisa gelombang *fault* menggunakan metode EAR. Dengan metode EAR, kita dapat melihat perbedaan motor BLDC pada saat normal dan pada saat *fault* dengan jelas. Berikut dijelaskan konstruksi motor BLDC yang digunakan untuk pengujian.

### 3.3.1 Stator

Stator ialah bagian motor yang diam yang berfungsi sebagai medan putar rotor untuk memberikan gaya elektromagnet sehingga rotor dapat berputar. Stator pada motor BLDC terbuat dari dari baja yang

terlaminasi yang berfungsi sebagai tempat lilitan kawat. Lilitan kawat pada motor BLDC dihubungkan dengan konfigurasi bintang atau wye.

### **3.3.2 Rotor**

Rotor adalah bagian motor yang berputar yang diakibatkan adanya gaya elektromagnet dari stator. Pada motor BLDC bagian rotornya berbeda dengan motor DC yang hanya tersusun atas satu elektromagnet. Sedangkan, motor BLDC tersusun dari beberapa permanen magnet yang saling direkatkan dan jumlahnya dapat divariasikan. Jumlah kutub magnet berbanding lurus dengan torsi motor namun berbanding terbalik dengan kecepatan, dimana semakin banyak jumlah kutub magnet pada rotor maka semakin tinggi torsi yang dihasilkan namun kecepatannya akan menurun. Selain itu, torsi juga dipengaruhi oleh densitas fluks magnet, dimana semakin besar densitas fluks magnet maka torsi yang dihasilkan menjadi besar.

### **3.3.3 Core**

Core merupakan inti dasar pada stator dan rotor pada motor. Core terbuat dari bahan logam yang mampu menghasilkan gaya feromagnetik yang dapat menghasilkan fluks maksimum. Bahan dasar core biasanya terbuat dari bahan steel. Bahan steel memiliki sifat kemagnetan yang sangat baik.

### **3.3.4 Permanen Magnet**

Permanen magnet memiliki beberapa tipe material. Pada umumnya material dari neodymium seperti NdFeB, NIB maupun magnet neo. NdFeB merupakan gabungan material dari neodymium, Ferit dan Boron. Dimana tingkat daya tarik pada magnet tersebut sangat kuat. Disamping itu NdFeB juga banyak digunakan dalam implementasi motor listrik. Kumputan medan stator diberi medan magnet berputar dari pemberian tegangan yang berurutan. Arus disuplai dengan encoder komutasi dalam merespon sinyal dari optik atau sensor efek hall untuk menggantikan komutasi mekanik. Dengan demikian bisa dihilangkan rugi-rugi gesek sikat dan komutator.

### **3.3.5 Hall Sensor**

Hall sensor dibutuhkan sebagai sensor yang memberikan informasi kepada kontroler untuk mengatur lilitan kawat yang harus dialiri oleh listrik. Hall sensor merupakan transduser yang dapat menghasilkan tegangan yang bervariasi ketika terjadi perbedaan medan



magnet. Pada waktu rotor berputar, perubahan medan magnet dari lilitan kawat dideteksi oleh hall sensor sebagai input kontroler sehingga proses komutasi dapat berjalan secara kontinyu.



**Gambar 3. 20** Motor BLDC pengujian surja

### **3.4 Perancangan Skema Pengujian Surja**

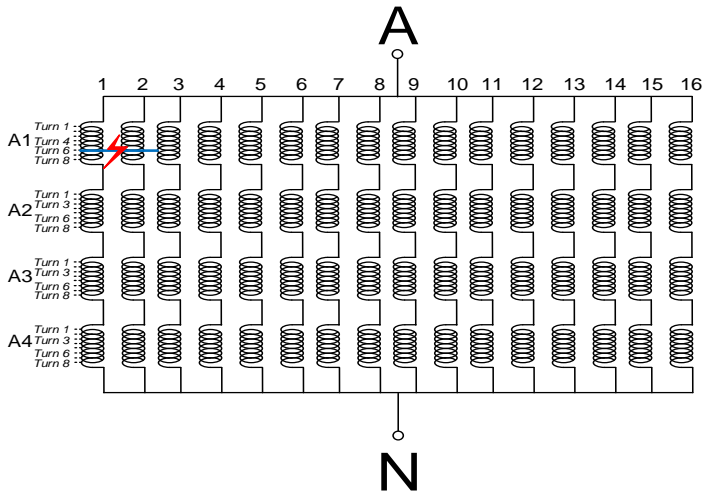
Pengujian surja yang dilakukan pada motor BLDC tidak dilakukan secara acak. Pengujian dilakukan dengan memberikan skema yang teratur sehingga hasil yang diperoleh valid dan dapat dipertanggung jawabkan. Berikut skema yang telah dibuat. Pengujian surja dilakukan dengan membuat skema *short circuit* fasa ke netral. *Short circuit* dibuat dengan cara menghubungkan fasa belitan dengan menggunakan kawat yang dihubungkan sesuai skema yang ada. Pembuatan skema *short circuit* dibuat pada *Turn* ke 6 pada setiap fasa dikarenakan *Turn* ke 6 memiliki posisi belitan paling luar sehingga diasumsikan sangat rentan terjadi *short circuit*. Berikut skema *short circuit* yang dilakukan pada penelitian kali ini

#### **3.4.1 Pengujian Fault Antar Paralel pada Fasa A**

Pengujian selanjutnya yaitu pengujian surja dengan *fault* antar paralel. Pengujian ini dilakukan dengan menghubungkan kawat paralel pada belitan dengan skema tertentu. Pengujian ini dilakukan untuk mengetahui *fault* yang terjadi pada fasa A akibat adanya hubung singkat fasa ke tanah. Pengujian dilakukan pada fasa A1 *turn* ke-6 karena memiliki lokasi paling luar dari belitan sehingga paling mudah terkena gangguan. Pengujian dilakukan sesuai skema paralel yang telah disusun

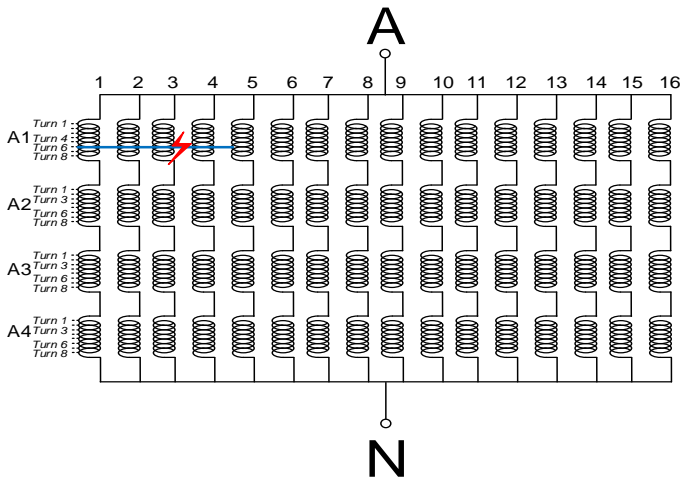
untuk mengetahui variasi gangguan yang ditimbulkan oleh adanya *short* paralel pada fasa A1. Pengujian dilakukan 5 kali pada tiap-tiap skema untuk menghasilkan data yang lebih akurat.

- Paralel 1-3 di *Short*



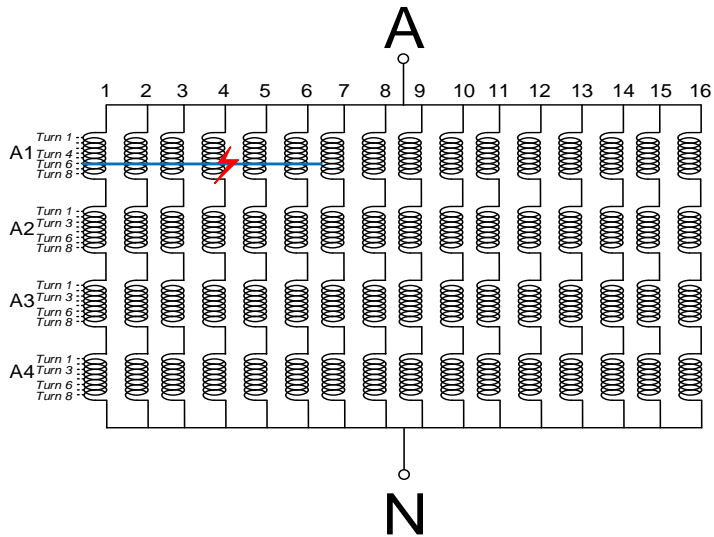
**Gambar 3.21** Skema pengujian *fault* paralel 3 *Shunt* fasa A

- Paralel 1-5 di *Short*



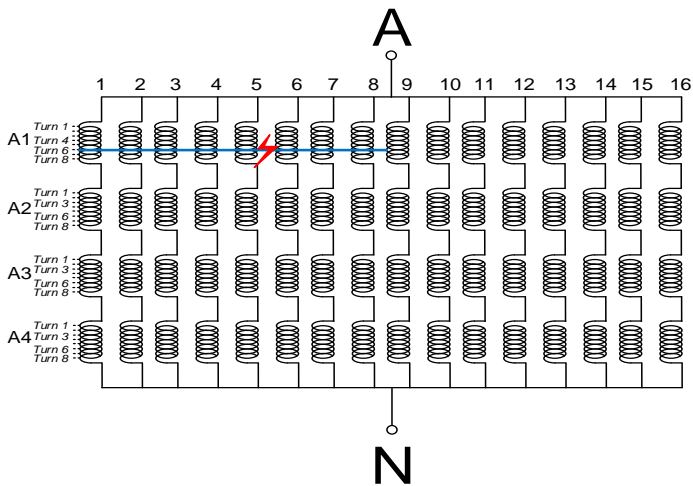
**Gambar 3.22** Skema pengujian *fault* paralel 5 *Shunt* fasa A

- Paralel 1-7 di *Short*



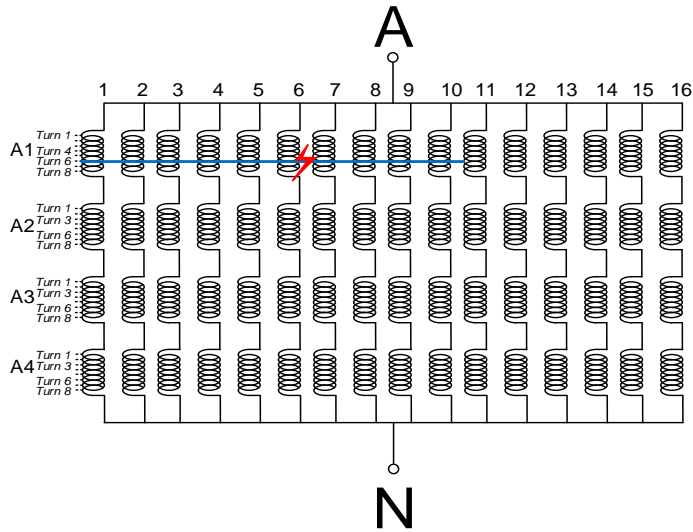
**Gambar 3.23** Skema pengujian *fault* paralel 7 *Shunt* fasa A

- Paralel 1-9 di *Short*



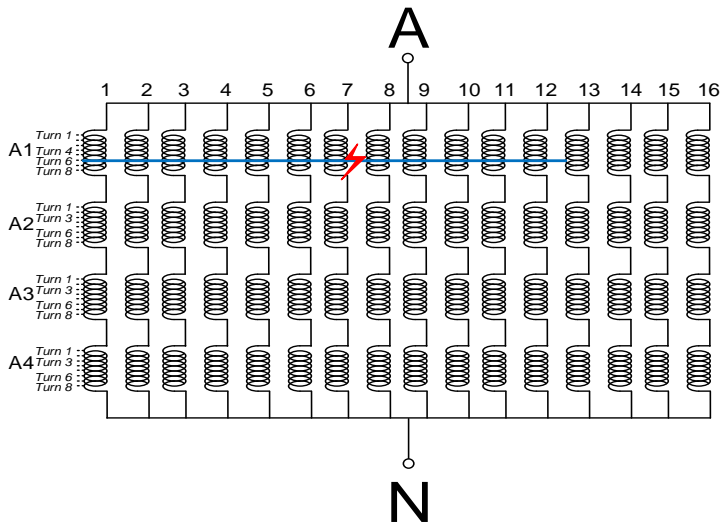
**Gambar 3.24** Skema pengujian *fault* paralel 9 *Shunt* fasa A

- Paralel 1-11 di *Short*



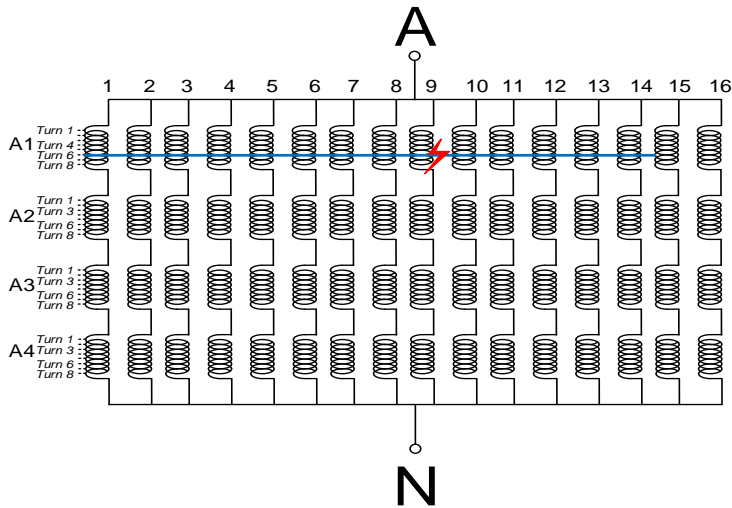
**Gambar 3.25** Skema pengujian *fault* paralel 11 *Shunt* fasa A

- Paralel 1-13 di *Short*



**Gambar 3.26** Skema pengujian *fault* paralel 13 *Shunt* fasa A

- Paralel 1-15 di *Short*



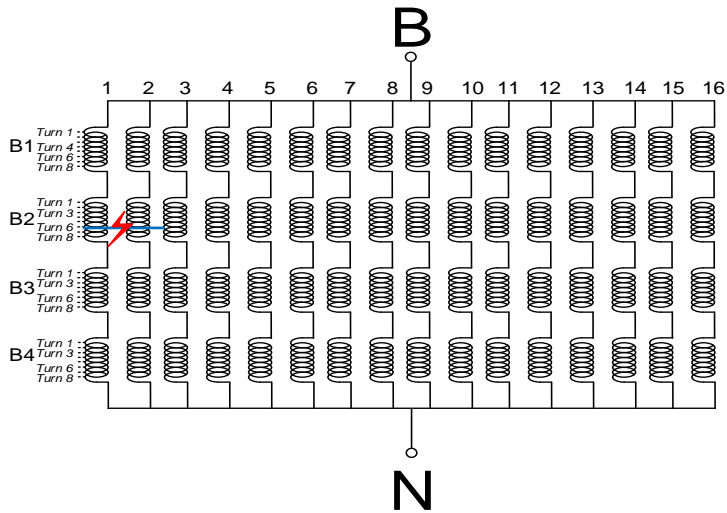
**Gambar 3.27** Skema pengujian *fault* paralel 15 *Shunt* fasa A

### 3.4.2 Pengujian *Fault* Antar Paralel pada Fasa B

Pengujian selanjutnya yaitu pengujian surja dengan *fault* antar paralel pada fasa B. Pengujian ini dilakukan dengan menghubungkan kawat paralel pada belitan dengan skema tertentu. Pengujian ini dilakukan untuk mengetahui *fault* yang terjadi pada fasa B akibat adanya hubung singkat fasa ke tanah. Pengujian dilakukan pada fasa B2 *turn* ke 6 karena *turn* ke 6 terletak pada belitan terluar dari motor BLDC sehingga rentan untuk terkena gangguan akibat adanya hubung singkat. Pengujian dilakukan 5 kali pada tiap-tiap skema untuk menghasilkan data yang lebih akurat. Pengujian *fault* pada fasa B digunakan untuk mengetahui *threshold fault* paralel kawat pada fasa B dengan skema pengujian yang sama pada *fault* paralel pada fasa B.

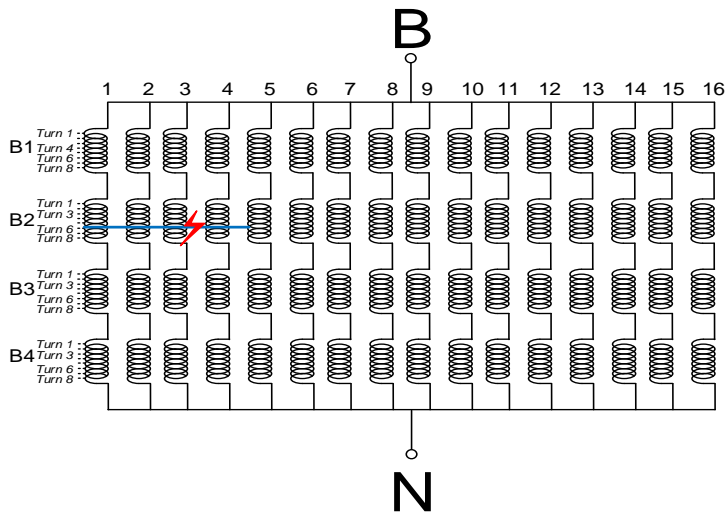
Pengujian paralel yang dilakukan pada fasa B meliputi, short paralel 1-3, paralel 1-5, paralel 1-7, paralel 1-9, paralel 1-11, paralel 1-13, paralel 1-15. Pada tiap-tiap paralel akan diketahui besarnya nilai *Test-reff* EAR pada tiap paralel kawat kemudian akan dibandingkan dengan nilai *threshold* pada fasa B pada kondisi normal untuk mengidentifikasi adanya hubung singkat akibat gangguan fasa ke tanah pada fasa B.

- Paralel 1-3 di *Short*



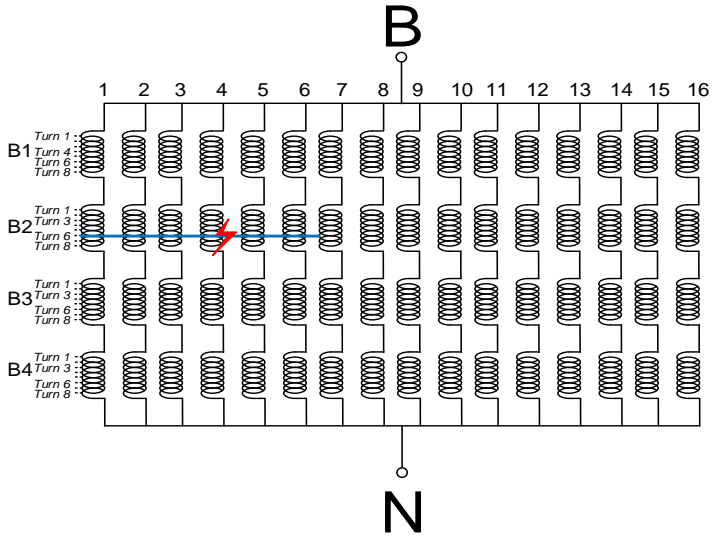
**Gambar 3.28** Skema pengujian *fault* paralel 3 *Shunt* fasa B

- Paralel 1-5 di *Short*



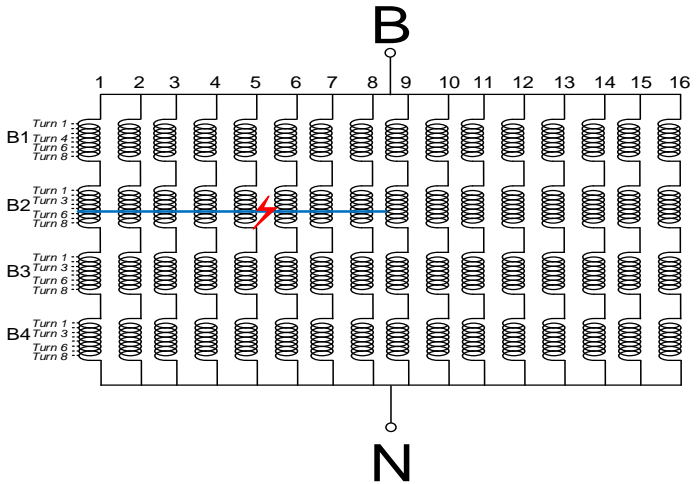
**Gambar 3.29** Skema pengujian *fault* paralel 5 *Shunt* fasa B

- Paralel 1-7 di *Short*



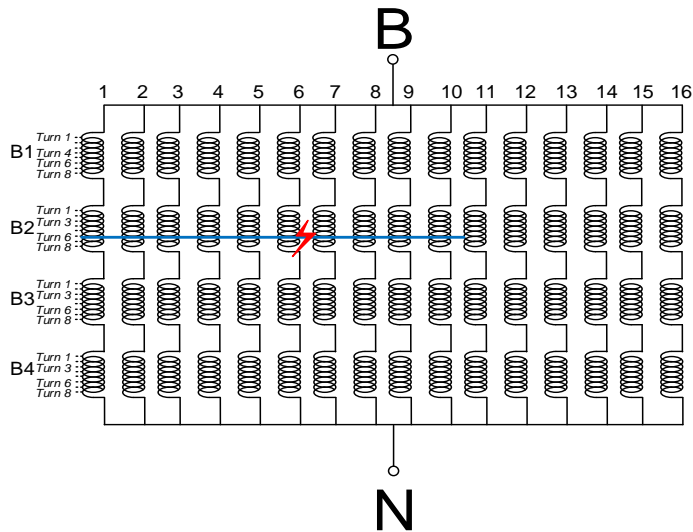
**Gambar 3.30** Skema pengujian *fault* paralel 7 *Shunt* fasa B

- Paralel 1-9 di *Short*



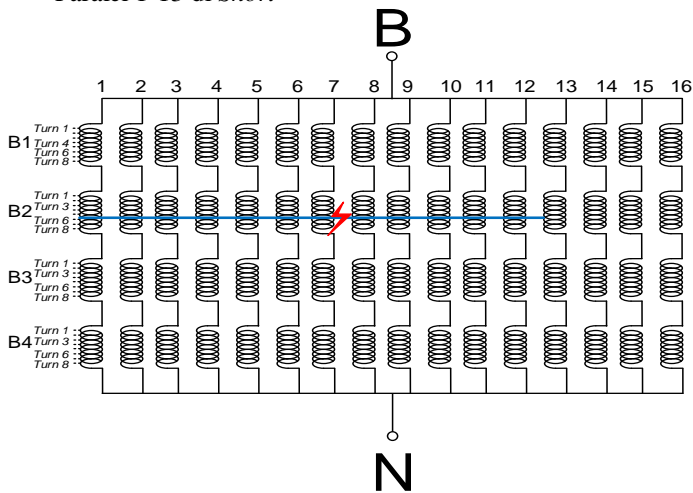
**Gambar 3.31** Skema pengujian *fault* paralel 9 *Shunt* fasa B

- Paralel 1-11 di *Short*



**Gambar 3.32** Skema pengujian *fault* paralel 11 *Shunt* fasa B

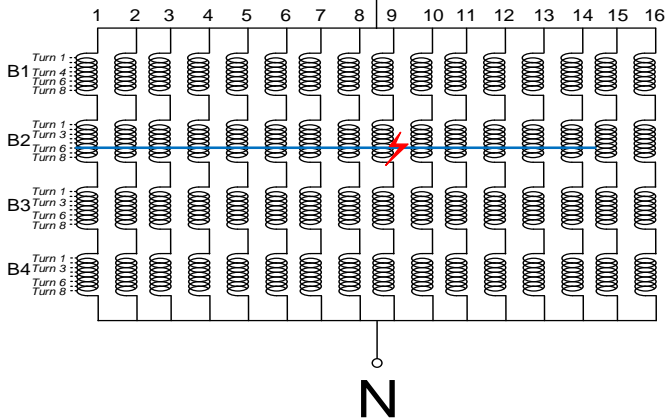
- Paralel 1-13 di *Short*



**Gambar 3.33** Skema pengujian *fault* paralel 13 *Shunt* fasa B



- B

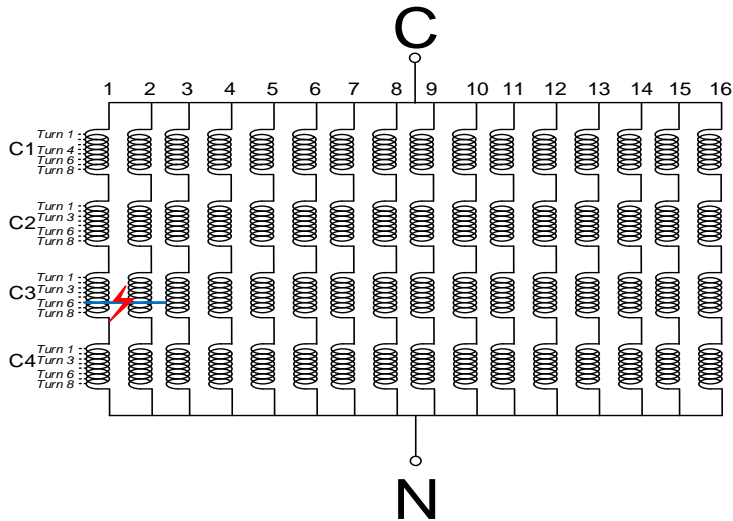


N

Pengujian selanjutnya yaitu pengujian surja dengan *fault* antar paralel pada fasa C. Pengujian ini dilakukan dengan menghubungkan kawat paralel pada belitan dengan skema tertentu. Pengujian ini dilakukan untuk mengetahui *fault* yang terjadi pada fasa C akibat adanya hubung singkat fasa ke tanah. Pengujian dilakukan pada fasa C3 *turn* ke 6 karena terletak pada belitan terluar dari motor sehingga mudah terkena gangguan akibat *short* pada belitan. Pengujian dilakukan 5 kali pada tiap-tiap skema untuk menghasilkan data yang lebih akurat. Pengujian *fault* pada fasa C digunakan untuk mengetahui *threshold fault* paralel kawat pada fasa C dengan skema pengujian yang sama pada *fault* paralel pada fasa C.

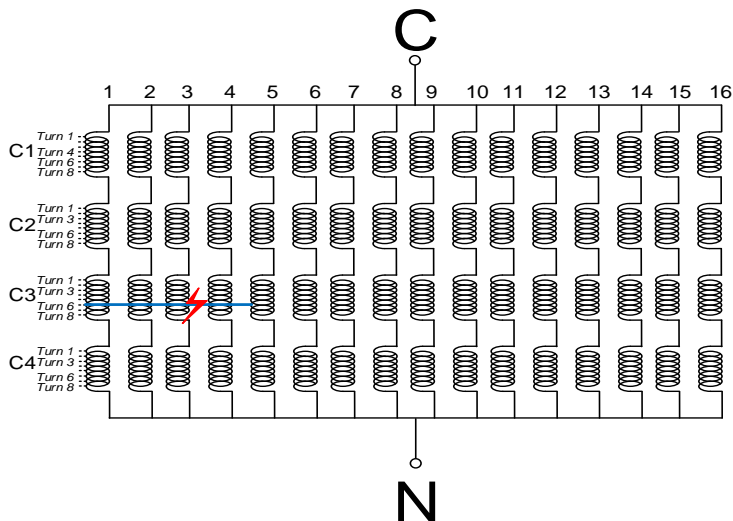
43

- Paralel 1-3 di *Short*



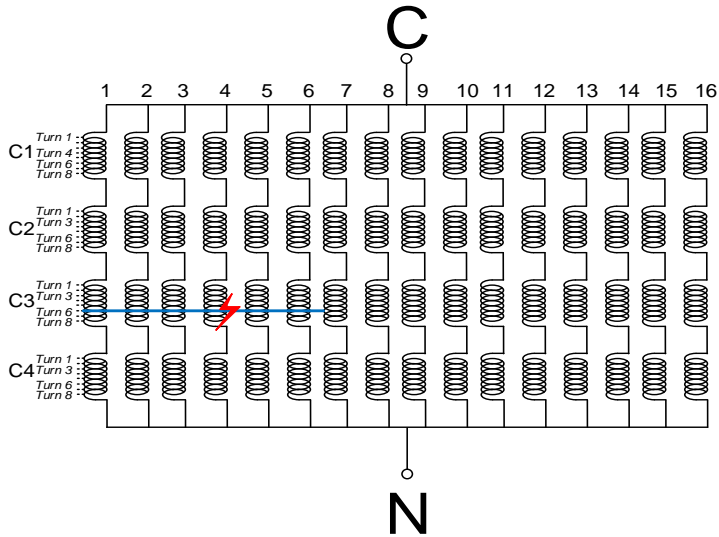
**Gambar 3.35** Skema pengujian *fault* paralel 3 *Shunt* fasa C

- Paralel 1-5 di *Short*



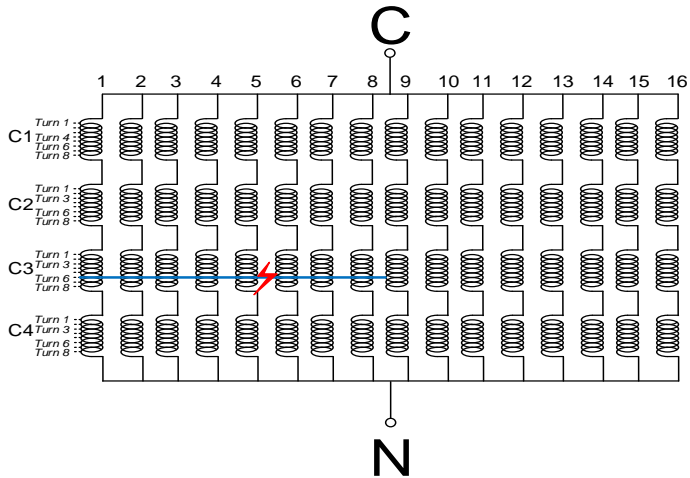
**Gambar 3.36** Skema pengujian *fault* paralel 5 *Shunt* fasa C

- Paralel 1-7 di *Short*



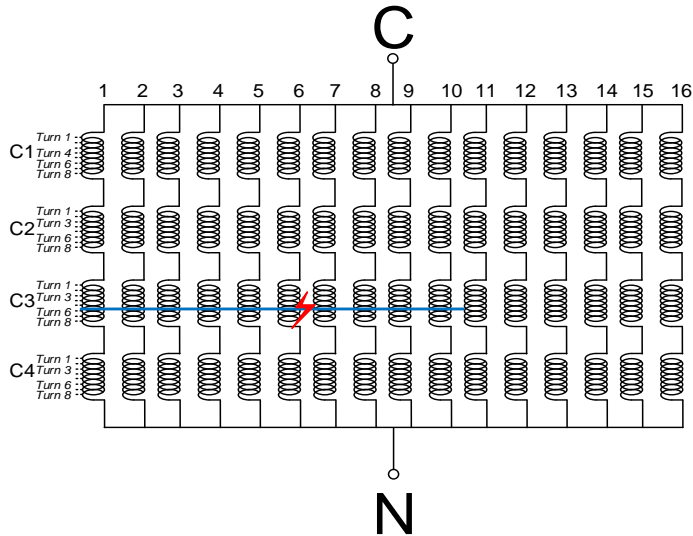
**Gambar 3.37** Skema pengujian *fault* paralel 7 *Shunt* fasa C

- Paralel 1-9 di *Short*



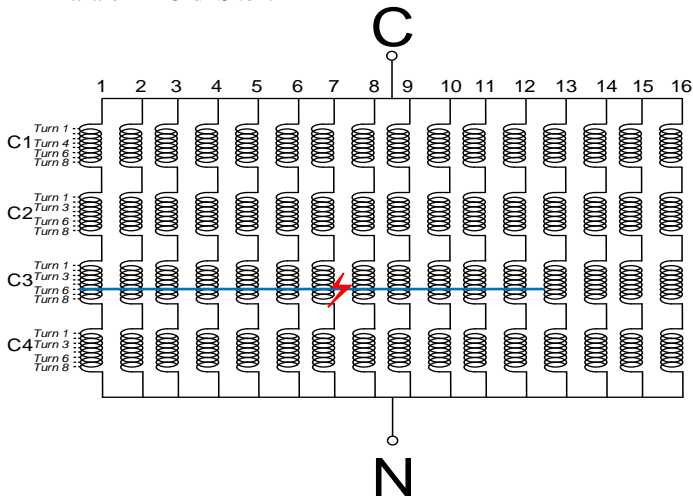
**Gambar 3.38** Skema pengujian *fault* paralel 9 *Shunt* fasa C

- Paralel 1-11 di *Short*



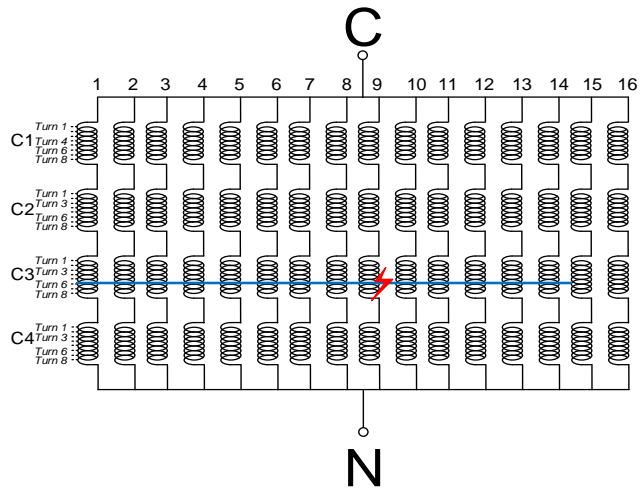
**Gambar 3.39** Skema pengujian *fault* paralel 11 *Shunt* fasa C

- Paralel 1-13 di *Short*



**Gambar 3.40** Skema pengujian *fault* paralel 13 *Shunt* fasa C

- Paralel 1-15 di *Short*



**Gambar 3.41** Skema pengujian *fault* paralel 15 *Shunt* fasa C

*Halaman ini sengaja dikosongkan*

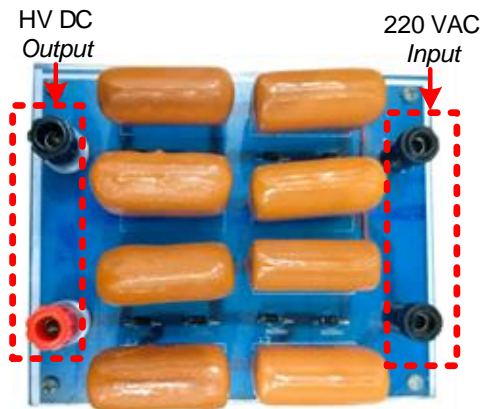
## BAB 4

### DETEKSI KERUSAKAN HUBUNG SINGKAT FASA KE TANAH MOTOR BLDC MENGGUNAKAN METODE EAR

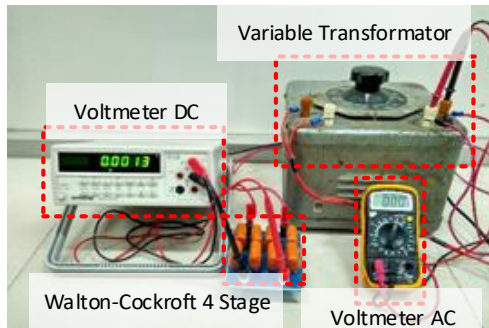
Pada bagian ini, memuat hasil pengujian serta analisa hasil pengujian belitan motor BLDC akibat adanya hubung singkat fasa ke tanah. Pengujian dilakukan sesuai dengan skema yang telah dijelaskan pada bab sebelumnya. Untuk menganalisa data dari hasil pengujian yang didapatkan digunakan metode *Error Area Ratio* (EAR).

#### 4.1 Hasil dan analisa pengujian rangkaian *Walton cockroft*

Pada pengujian ini digunakan *variable* transformator sebagai sumber AC 220V. Tegangan dari *Variable* Transformator kemudian dinaikkan secara bertahap dari 0-220V, dikarenakan pada penelitian kali ini hanya digunakan 2 tingkat pengali tegangan pada rangkaian *walton cockroft*. Peralatan yang digunakan untuk mengukur tegangan pada rangkaian *Walton Cockroft* adalah *Voltmeter* AC dan *Voltmeter* DC. *Voltmeter* AC digunakan untuk mengukur tegangan *output* dari *Variable Transformer* sedangkan *Voltmeter* DC digunakan untuk mengukur tegangan *output* dari rangkaian *Walton cockroft*.



**Gambar 4. 1** Rangkaian *Walton Cockroft* 4 stage



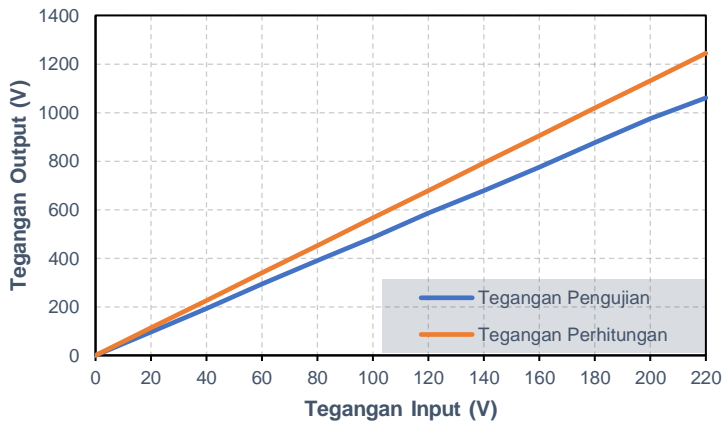
**Gambar 4. 2** Pengukuran tegangan rangkaian *Walton Cockroft*

Pengukuran tegangan pada rangkaian *Walton cockroft* dilakukan secara bertahap dari 0V - 220V. Kemudian tegangan *output* dari rangkaian *Walton cockroft* juga diukur seiring dengan dinaikkannya tegangan AC *input*. Hasil dari pengukuran tegangan *output* DC pada rangkaian *Walton cockroft* akan dibandingkan dengan dengan perhitungan tegangan *output* pada rangkaian *Walton cockroft*.

**Tabel 4. 1** Hasil pengujian dan perhitungan *Walton cockroft*

Tegangan Input AC (Volt)	Tegangan output pengujian (volt)	Tegangan output Perhitungan (volt)
0	0	0
20	95,14	113,14
40	192,22	226,27
60	293,30	339,41
80	391,20	452,55
100	485,21	565,69
120	585,60	678,82
140	678,20	791,96
160	775,80	905,10
180	876,30	1018,23
200	974,60	1131,37
220	1060,50	1244,51





**Gambar 4. 3** Grafik perbandingan *output* pengujian dengan perhitungan

Dari hasil pengujian terdapat *error* atau selisih pengukuran tegangan antara tegangan uji dan tegangan perhitungan. Hal ini terjadi karena beberapa faktor diantaranya rugi-rugi yang terdapat pada komponen, *ripple* tegangan pada rangkaian *walton cockroft*. *Error* rata-rata yang terdapat pada *output* tegangan DC pada rangkaian *walton cockroft* adalah sebesar 14%.

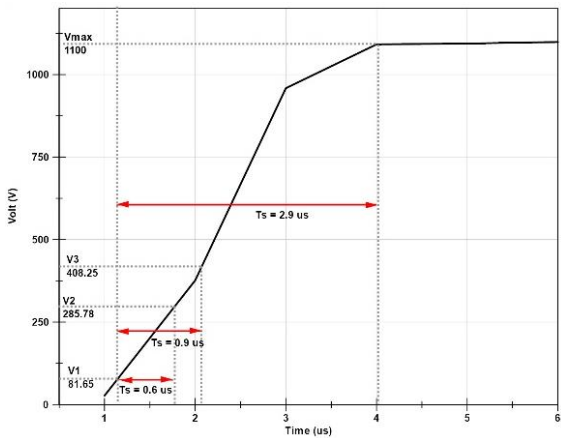
#### 4.2 Hasil dan Analisa Pengujian *Rise Time* Gelombang Surja

Pengujian dilakukan menurut standar yang tercantum pada IEEE 522 untuk menentukan *rise time* tegangan surja. Pengujian *rise time* gelombang surja dilakukan untuk mengetahui standar tegangan uji agar sesuai dengan standar yang ada pada IEEE 522. Hasil percobaan *rise time* gelombang surja menunjukkan bahwa *rise time* yang terjadi adalah sekitar 2.9  $\mu$ s. Sehingga standar surja yang digunakan sesuai dengan IEEE 522 adalah tegangan nominal ( ) dikalikan dengan pu nominal ( sehingga didapatkan angka 408.25 V.

Namun, sesuai dengan standar yang ditetapkan oleh *Baker Instrumnet* untuk tegangan surja yang direkomendasikan adalah 500V. Karena hasil dari pengujian belum sesuai dengan standar yang ada pada *Baker Instrument* maka perlu digunakan standar yang lain. Sehingga

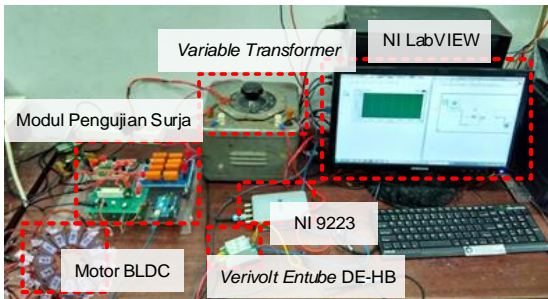
direkomendasikan standar pengujian surja yang lain yaitu standar EASA yakni sebesar:

$$V_{max} = (2 \times V_L) + 1000 \tag{4.1}$$



**Gambar 4. 4** Standar *rise time* yang digunakan[9]

Sehingga nilai yang diperoleh adalah sekitar 1200V. Sehingga dari standar yang digunakan oleh EASA dapat diketahui nilai maksimal tegangan surja yang direkomendasikan. Sehingga dengan menggunakan tegangan sebesar 1000V, maka untuk standar pengujian surja sudah memenuhi standar yang digunakan dan aman karena range pengujian yang diperbolehkan adalah antara 500V sampai 1200V.



**Gambar 4. 5** Implementasi Pengujian Surja

Pengujian dilakukan 5 kali tiap percobaan pada skema *fault* yang akan diuji agar didapatkan hasil dengan akurat untuk meminimalkan kesalahan (*error*) pada tiap percobaan yang dilakukan.

#### 4.3 Hasil dan Analisa Pengujian Nilai Resistansi dan Induktansi

Pengujian Resistansi (R) dan Induktansi dilakukan untuk mengetahui pengaruh dari R dan L terhadap frekuensi isolasi akibat adanya gelombang surja. Jika terjadi hubung singkat pada belitan, maka nilai R dan L akan menjadi lebih kecil sehingga tegangan surja yang dibangkitkan akan semakin besar. Dibawah ini adalah tabel nilai R dan L pada belitan motor BLDC dari hasil pengujian.

**Tabel 4. 2** Hasil pengujian induktansi (L) dan Resistansi (R)

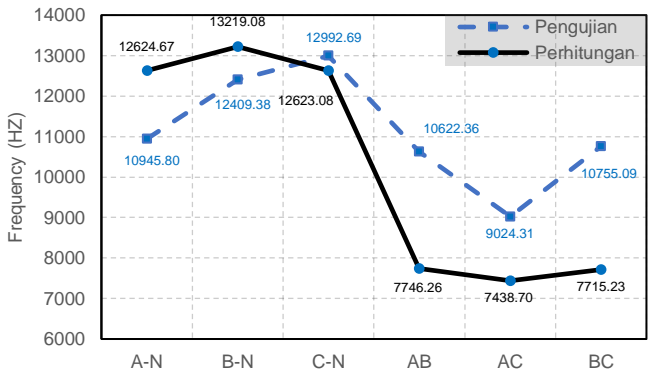
Belitan	Resistansi	Induktansi
A-N	0.871 $\Omega$	79.40 $\mu$ H
B-N	0.933 $\Omega$	72.42 $\mu$ H
C-N	0.952 $\Omega$	79.42 $\mu$ H
AB	2.033 $\Omega$	210.9 $\mu$ H
AC	2.625 $\Omega$	228.7 $\mu$ H
BC	2.534 $\Omega$	212.6 $\mu$ H

Dari persamaan 2.2 dan 2.3 maka dapat dihitung frekuensi osilasi yang terbangkitkan dari gelombang surja. Kemudian frekuensi dari hasil pengujian surja dibandingkan dengan frekuensi pada kondisi normal. Frekuensi surja dapat didapat dengan melihat panjang 1 gelombang awal kemudian dihitung dengan rumus  $f = 1/T$  dengan T adalah panjang 1 periode gelombang awal surja.

**Tabel 4. 3** Perbandingan Frekuensi Perhitungan dengan Pengujian

Belitan	Frekuensi perhitungan (Hz)	Frekuensi Pengujian (Hz)	Error (%)
A – N	12624.67	10945.80	13.3
B – N	13219.08	12409.38	6.13
C – N	12623.08	12992.69	2.84
AB	7746.26	10622.36	27.08
AC	7438.704	9024.31	17.57
BC	7715.227	10755.09	28.26

Dari hasil percobaan yang diperoleh nilai frekuensi pengujian tidak jauh berbeda dengan frekuensi perhitungan. *Error* yang dihasilkan cukup kecil dengan rata-rata *error* sebesar 15,8%. Sehingga teori yang dipakai sudah sesuai dengan hasil percobaan yang dilakukan. Dari hasil pengujian induktansi dan resistansi pada belitan motor, semakin besar nilai resistansi dan induktansi suatu belitan, frekuensi isolasi pada gelombang surja akan semakin besar juga.

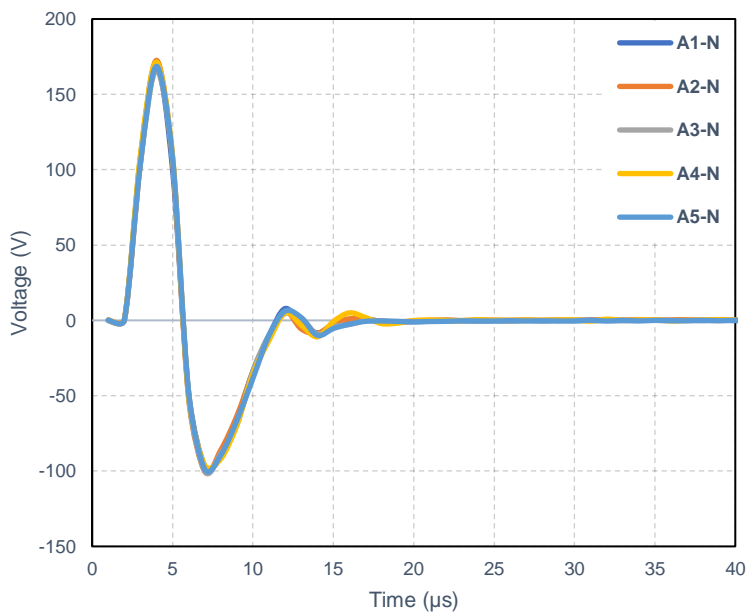


**Gambar 4. 6** Perbandingan Frekuensi perhitungan dan pengujian

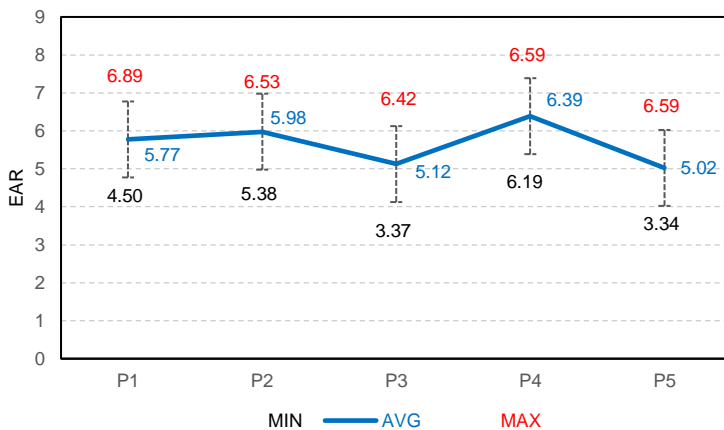
#### 4.4 Hasil dan Analisa Pengujian Surja pada motor BLDC pada Kondisi Normal

Pengujian dilakukan sesuai dengan skema yang telah dibuat pada bab 3. Nilai pengujian surja pada kondisi normal dapat dijadikan sebagai acuan (*Threshold*) untuk diagnosa untuk menentukan kerusakan pada motor BLDC menggunakan tegangan surja.

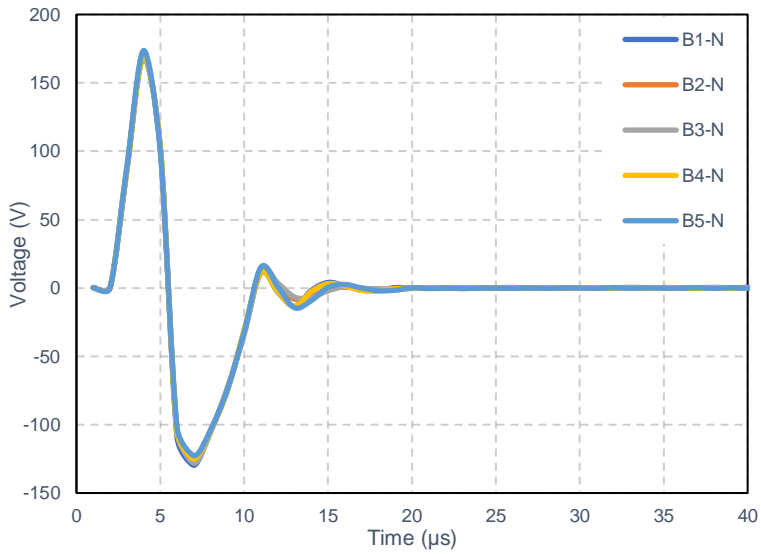
Pengujian pada kondisi normal dilakukan sebanyak 5 kali tiap percobaan. Kemudian dihitung nilai EAR dan nilai EAR rata-rata dari lima gelombang uji. Nilai EAR tersebut dijadikan sebagai acuan (*Threshold*) untuk kondisi motor BLDC dalam keadaan normal. Dibawah ini adalah hasil pengujian yang telah dilakukan.



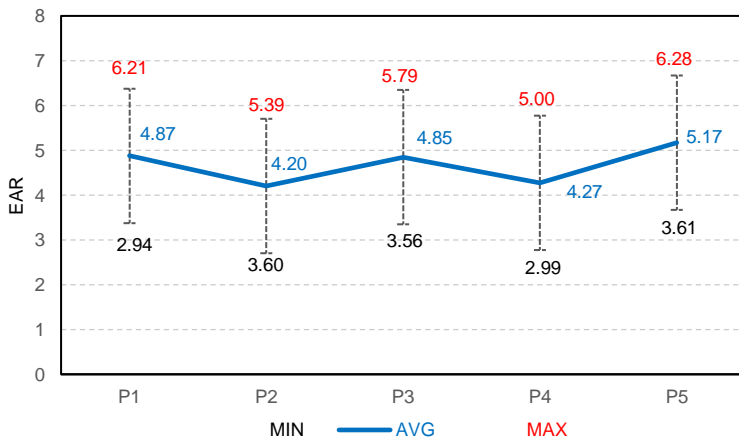
**Gambar 4. 7** Gelombang surja fase A kondisi normal



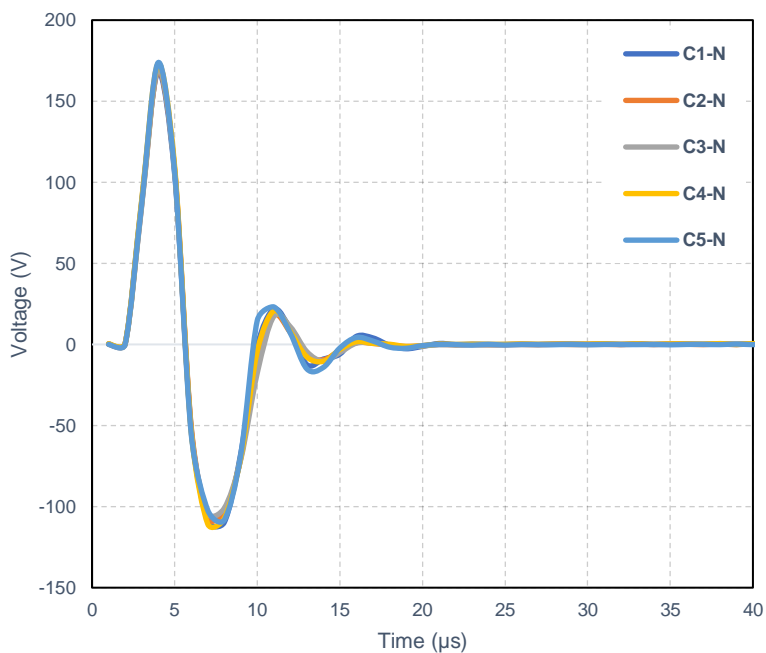
**Gambar 4. 8** EAR fase A pada kondisi normal



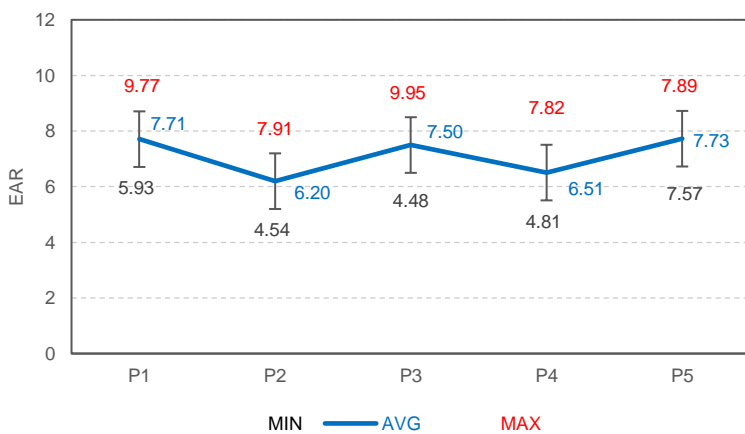
**Gambar 4. 9** Gelombang surja fase B kondisi normal



**Gambar 4. 10** EAR fase B pada kondisi normal



**Gambar 4. 11** Gelombang surja fasa C kondisi normal



**Gambar 4. 12** EAR fasa C pada kondisi normal

**Tabel 4. 4** Standar *threshold test-reff* EAR pengujian motor BLDC kondisi normal

Phasa A-N (%)								
Percobaan	P1	P2	P3	P4	P5			
Min	4.50	5.38	3.37	6.19	3.34			
Avg	5.77	5.98	5.12	6.39	5.02			
Max	6.89	6.53	6.42	6.59	6.59			
Phasa B-N (%)								
Percobaan	P1	P2	P3	P4	P5			
Min	2.94	3.60	3.56	2.99	3.61			
Avg	4.87	4.20	4.85	4.27	5.17			
Max	6.21	5.39	5.79	5.00	6.28			
Phasa C-N (%)								
Percobaan	P1	P2	P3	P4	P5			
Min	5.93	4.54	4.48	4.81	7.57			
Avg	7.71	6.20	7.50	6.51	7.73			
Max	9.77	7.91	9.95	7.82	7.89			
Phase A-N (%)			Phase B-N (%)			Phase C-N (%)		
Min	Avg	Max	Min	Avg	Max	Min	Avg	Max
4.56	5.66	6.61	3.34	4.67	5.74	5.47	7.13	8.67

Dari tabel diatas pada kondisi normal *threshold* dari fasa A adalah 5.66%. Nilai ini mengindikasikan bahwa jika pada fasa A diuji hubung singkat ke tanah dan memilki nilai *Test-reff* EAR dibawah 5.66%, maka belum terindikasi adanya hubung singkat fasa ke tanah pada fasa A. Pada pengujian fasa B-N diketahui bahwa nilai *threshold* fasa B-N adalah sebesar 4.67%. jika fasa B diuji hubung singkat fasa ke tanah dan memiliki *Test-reff* lebih besar dari 4.67% maka pada fasa B terindikasi adanya hubung singkat akibat adanya gangguan. Dari hasil pengujian normal pada fasa C diketahui bahwa nilai *threshold* dari fasa C adalah 7.13%. Jika dari pada fasa C diuji dan memiliki nilai *Test-reff* EAR



lebih kecil dari 7.13% maka pada fasa C belum terindikasi adanya hubung singkat akibat gangguan pada motor BLDC. Namun, sesuai standar yang telah ditetapkan *Baker Instrument*, nilai *threshold* untuk *test-reff* EAR motor masih dalam kondisi normal jika nilai *Threshold* berkisar 10%. Jika nilai *Threshold* sudah melebihi 10%, maka motor dapat didiagnosa mengalami gangguan akibat adanya *short circuit*.

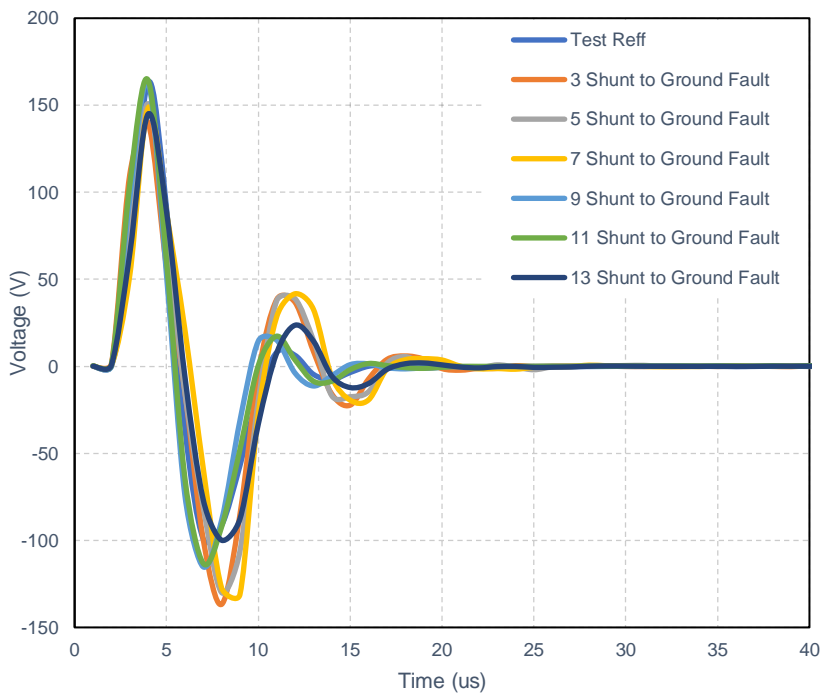
#### **4.5 Hasil dan Analisa Pengujian Surja pada motor BLDC pada Kondisi *Fault* Fasa ke Tanah**

Skema pengujian *fault* fasa A ke tanah pada motor BLDC telah dijabarkan pada bab sebelumnya. Pengujian dilakukan sebanyak 5 kali pada tiap paralel belitan sesuai dengan skema pengujian sehingga dihasilkan data yang lebih akurat. Analisa menggunakan *Test-reff* EAR dan LL EAR pada tiap fasa.

Pengujian surja dengan *fault* antar kawat paralel ke tanah dilakukan seperti pada skema yang telah dibuat dalam bab sebelumnya. Pengujian ini dilakukan untuk mengetahui tingkat kerusakan yang ditimbulkan akibat gangguan *fault* antar kawat paralel pada tiap fasa. Selain itu, hasil dari pengujian ini juga digunakan sebagai nilai acuan (*threshold*) pada pengujian motor BLDC dengan kondisi tertentu. Berikut hasil pengujian dan analisa yang telah disusun.

##### **4.5.1 *Fault* Fasa A ke Tanah**

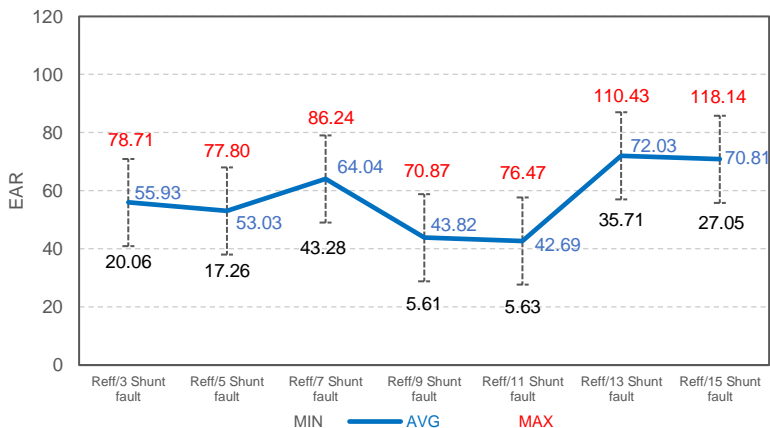
Pengujian surja pada penelitian kali ini dilakukan untuk mengetahui tingkat kerusakan yang ditimbulkan akibat adanya gangguan hubung singkat fasa ke tanah pada fasa A. Pengujian *fault* fasa A ke tanah dilakukan sebanyak 5 kali pada tiap kasus yang meliputi, *fault* shunt 3 ke tanah, *fault* shunt 5 ke tanah, *fault* shunt 7 ke tanah, *fault* shunt 9 ke tanah, *fault* shunt 11 ke tanah, *fault* shunt 13 ke tanah, dan *fault* shunt 15 ke tanah. Pengujian ini dilakukan untuk mengetahui kerusakan yang ditimbulkan akibat *short circuit* fasa ke tanah pada tiap tiap paralel kawat sesuai dengan jumlah shunt nya. Berikut adalah hasil pengujian *fault* fasa ke tanah pada fasa A. Dari hasil pengujian maka motor BLDC pada kondisi *fault* akan didapat nilai *Test-reff* EAR pada tiap kondisi *fault*. Nilai EAR akan menjadi standar *threshold* motor BLDC pada kondisi *fault* untuk dibandingkan dengan nilai *threshold* motor BLDC pada kondisi normal.



**Gambar 4. 13** Gelombang surja fase A kondisi *Fault*

**Tabel 4. 5** Hasil *Test-ref* EAR pengujian phase A-N

<i>Fault</i>	<i>Test-ref</i> EAR Phase A-N		
	Min	Avg	Max
Reff / Shunt 3 <i>fault</i>	20.06	55.93	78.71
Reff / Shunt 5 <i>fault</i>	17.26	53.03	77.80
Reff / Shunt 7 <i>fault</i>	43.28	64.04	86.24
Reff / Shunt 9 <i>fault</i>	5.61	43.82	70.87
Reff / Shunt 11 <i>fault</i>	5.63	42.69	76.47
Reff / Shunt 13 <i>fault</i>	35.71	72.03	110.43
Reff / Shunt 15 <i>fault</i>	27.05	70.81	118.14

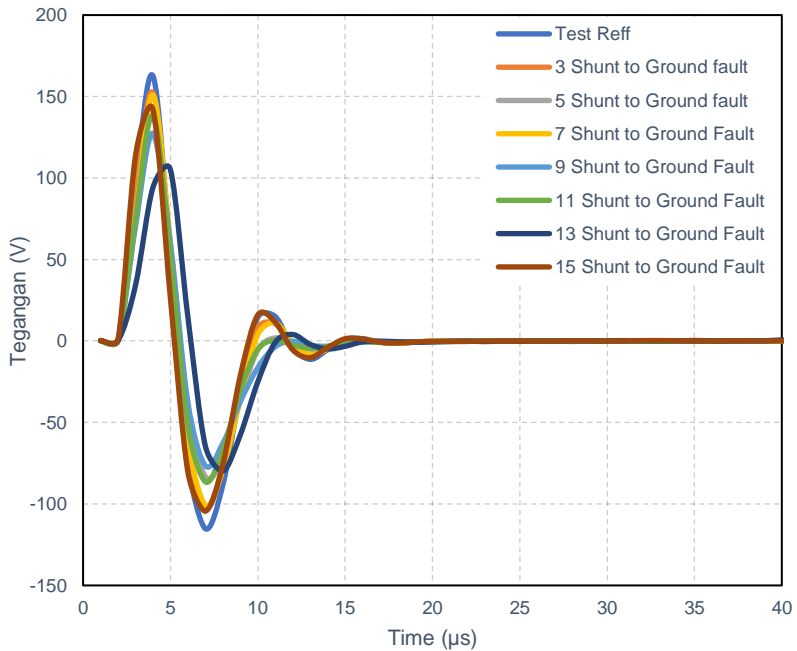


**Gambar 4. 14** EAR fase A pada kondisi *fault*

Dari data diatas dapat diketahui bahwa *short* antar paralel memiliki nilai EAR yang cukup besar dan bervariasi. Nilai *threshold* yang didapat dari pengujian surja dengan *fault* pada tiap-tiap Shunt ke netral adalah sebesar 5.66%. Sehingga, jika pengujian surja pada motor BLDC dengan hasil nilai *Test-ref* EAR sebesar 5.66% atau lebih maka motor tersebut terindikasi mengalami gangguan (*fault*) Fasa ke tanah akibat adanya *short* pada fasa A.

#### 4.5.2 *Fault* Fasa B ke Tanah

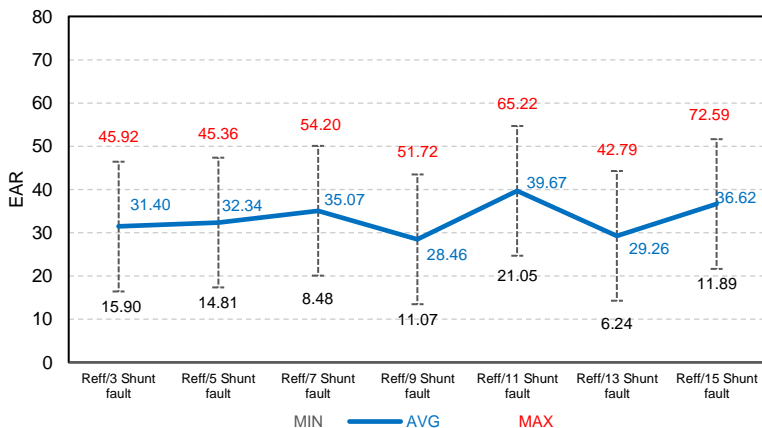
Pengujian surja pada penelitian kali ini dilakukan untuk mengetahui tingkat kerusakan yang ditimbulkan akibat adanya gangguan hubung singkat fasa ke tanah pada fasa B. Pengujian *fault* fasa B ke tanah dilakukan sebanyak 5 kali pada tiap kasus yang meliputi, *fault* shunt 3 ke tanah, *fault* shunt 5 ke tanah, *fault* shunt 7 ke tanah, *fault* shunt 9 ke tanah, *fault* shunt 11 ke tanah, *fault* shunt 13 ke tanah, dan *fault* shunt 15 ke tanah. Pengujian ini dilakukan untuk mengetahui kerusakan yang ditimbulkan akibat *short circuit* fasa ke tanah pada tiap tiap paralel kawat sesuai dengan jumlah shunt nya. Berikut adalah hasil pengujian *fault* fasa ke tanah pada fasa B.



**Gambar 4. 15** Gelombang surja fase B kondisi *Fault*

**Tabel 4. 6** Hasil *Test-refff* EAR pengujian fase B-N

<i>Fault</i>	<i>Test-refff</i> EAR Phase B-N		
	Min	Avg	Max
Reff / Shunt 3 <i>fault</i>	15.90	31.40	45.92
Reff / Shunt 5 <i>fault</i>	14.81	32.34	45.36
Reff / Shunt 7 <i>fault</i>	8.48	35.07	54.20
Reff / Shunt 9 <i>fault</i>	11.07	28.46	51.72
Reff / Shunt 11 <i>fault</i>	21.05	39.67	65.22
Reff / Shunt 13 <i>fault</i>	6.24	29.26	42.79
Reff / Shunt 15 <i>fault</i>	11.89	36.62	72.59

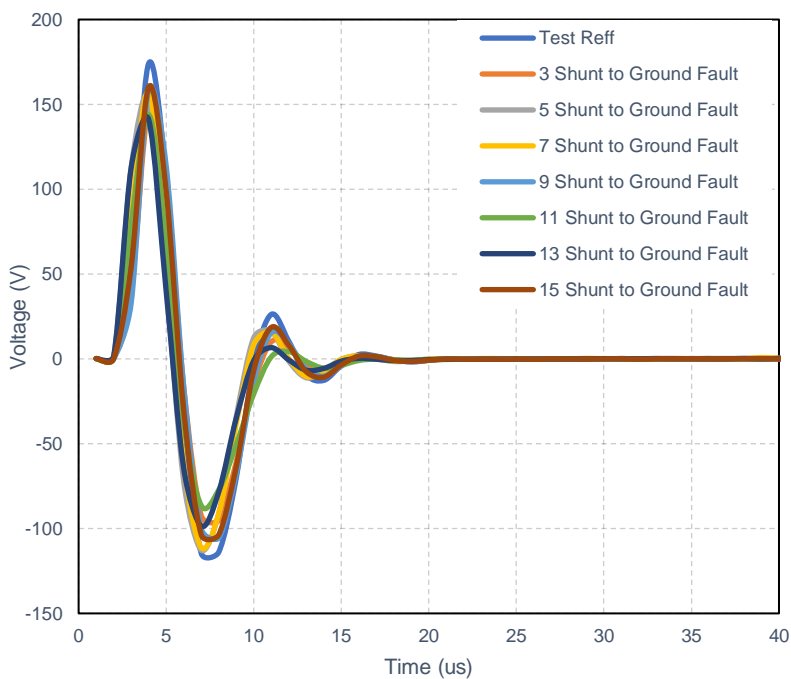


**Gambar 4. 16** EAR fase B pada kondisi *fault*

Dari data diatas dapat diketahui bahwa *short* antar paralel memiliki nilai EAR yang cukup besar dan bervariasi. Nilai *threshold* yang didapat dari pengujian surja dengan *fault* pada tiap-tiap Shunt ke netral adalah sebesar 4.67%. Sehingga, jika pengujian surja pada motor BLDC dengan hasil nilai *Test-ref* EAR sebesar 4.67% atau lebih maka motor tersebut terindikasi mengalami gangguan (*fault*) Fasa ke tanah akibat adanya *short* pada fasa B.

#### 4.5.3 *Fault* Fasa C ke Tanah

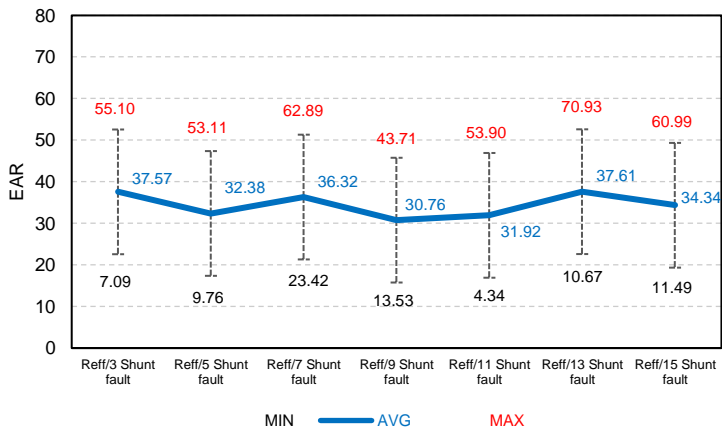
Pengujian surja pada penelitian kali ini dilakukan untuk mengetahui tingkat kerusakan yang ditimbulkan akibat adanya gangguan hubung singkat fasa ke tanah pada fasa C. Pengujian *fault* fasa C ke tanah dilakukan sebanyak 5 kali pada tiap kasus yang meliputi, *fault* shunt 3 ke tanah, *fault* shunt 5 ke tanah, *fault* shunt 7 ke tanah, *fault* shunt 9 ke tanah, *fault* shunt 11 ke tanah, *fault* shunt 13 ke tanah, dan *fault* shunt 15 ke tanah. Pengujian ini dilakukan untuk mengetahui kerusakan yang ditimbulkan akibat *short circuit* fasa ke tanah pada tiap tiap paralel kawat sesuai dengan jumlah shunt nya. Berikut adalah hasil pengujian *fault* fasa ke tanah pada fasa C.



**Gambar 4. 17** Gelombang surja fasa C kondisi *Fault*

**Tabel 4. 7** Hasil *Test-ref* EAR pengujian fasa C-N

<i>Fault</i>	<i>Test-ref</i> EAR Phase C-N		
	Min	Avg	Max
Reff / Shunt 3 <i>fault</i>	7.09	37.57	55.10
Reff / Shunt 5 <i>fault</i>	9.76	32.38	53.11
Reff / Shunt 7 <i>fault</i>	23.2	36.32	62.89
Reff / Shunt 9 <i>fault</i>	13.53	30.76	43.71
Reff / Shunt 11 <i>fault</i>	4.34	31.92	53.90
Reff / Shunt 13 <i>fault</i>	10.67	37.61	70.93
Reff / Shunt 15 <i>fault</i>	11.49	34.34	60.99



**Gambar 4. 18** EAR fase C pada kondisi *fault*

Dari data diatas dapat diketahui bahwa *short* antar paralel pada fasa C memiliki nilai EAR yang cukup besar dan bervariasi. Nilai *threshold* yang didapat dari pengujian surja dengan *fault* pada tiap-tiap Shunt ke netral adalah sebesar 7.13%. Sehingga, jika pengujian surja pada motor BLDC dengan hasil nilai *Test-reff* EAR sebesar 7.13% atau lebih maka motor tersebut terindikasi mengalami gangguan (*fault*) Fasa ke tanah akibat adanya *short* pada fasa C.

**Tabel 4. 8** Nilai *Threshold* Normal Coil

Kriteria <i>fault</i>	Nilai <i>threshold</i> EAR (%)	
Normal Coil	Rekomendasi Baker	Max
<i>Test-reff</i> EAR Phase A Normal	10	6.61
<i>Test-reff</i> EAR Phase B Normal	10	5.74
<i>Test-reff</i> EAR Phase C Normal	10	8.67

**Tabel 4. 9** Nilai *Threshold Fault Coil* fasa A-N

Kriteria <i>fault</i>		Nilai <i>threshold</i> EAR (%)			
<i>Fault Coil</i>	Rekomendasi Baker	Normal	Min	Avg	Max
<i>Test-reff</i> EAR Shunt 3 <i>Fault</i>	10	5.66	20.06	55.93	78.71
<i>Test-reff</i> EAR Shunt 5 <i>Fault</i>	10	5.66	17.26	53.03	77.80
<i>Test-reff</i> EAR Shunt 7 <i>Fault</i>	10	5.66	43.28	64.04	86.24
<i>Test-reff</i> EAR Shunt 9 <i>Fault</i>	10	5.66	5.61	43.82	70.87
<i>Test-reff</i> EAR Shunt 11 <i>Fault</i>	10	5.66	5.63	42.69	76.47
<i>Test-reff</i> EAR Shunt 13 <i>Fault</i>	10	5.66	35.71	72.03	110.43
<i>Test-reff</i> EAR Shunt 15 <i>Fault</i>	10	5.66	27.05	70.81	118.14

**Tabel 4. 10** Nilai *Threshold Fault Coil* fasa B-N

Kriteria <i>fault</i>		Nilai <i>threshold</i> EAR (%)			
<i>Fault Coil</i>	Rekomendasi Baker	Normal	Min	Avg	Max
<i>Test-reff</i> EAR Shunt 3 <i>Fault</i>	10	4.67	15.90	31.40	45.92
<i>Test-reff</i> EAR Shunt 5 <i>Fault</i>	10	4.67	14.81	32.34	45.36
<i>Test-reff</i> EAR Shunt 7 <i>Fault</i>	10	4.67	8.48	35.07	54.20
<i>Test-reff</i> EAR Shunt 9 <i>Fault</i>	10	4.67	11.07	28.46	51.72
<i>Test-reff</i> EAR Shunt 11 <i>Fault</i>	10	4.67	21.05	39.67	65.22
<i>Test-reff</i> EAR Shunt 13 <i>Fault</i>	10	4.67	6.24	29.26	42.79
<i>Test-reff</i> EAR Shunt 15 <i>Fault</i>	10	4.67	11.89	36.62	72.59



**Tabel 4.11** Nilai *Threshold Fault Coil* fasa C-N

Kriteria <i>fault</i>		Nilai <i>threshold</i> EAR (%)			
<i>Fault Coil</i>	Rekomendasi Baker	Normal	Min	Avg	Max
<i>Test-reff</i> EAR Shunt 3 <i>Fault</i>	10	7.13	7.09	37.57	55.10
<i>Test-reff</i> EAR Shunt 5 <i>Fault</i>	10	7.13	9.76	32.38	53.11
<i>Test-reff</i> EAR Shunt 7 <i>Fault</i>	10	7.13	23.42	36.32	62.89
<i>Test-reff</i> EAR Shunt 9 <i>Fault</i>	10	7.13	13.53	30.76	43.71
<i>Test-reff</i> EAR Shunt 11 <i>Fault</i>	10	7.13	4.34	31.92	53.90
<i>Test-reff</i> EAR Shunt 13 <i>Fault</i>	10	7.13	10.67	37.61	70.93
<i>Test-reff</i> EAR Shunt 15 <i>Fault</i>	10	7.13	11.49	34.34	60.99

Dari beberapa percobaan yang telah dilakukan, *threshold* dari beberapa kondisi gangguan dijadikan sebuah data yang digunakan sebagai acuan untuk mendiagnosa saat melakukan pengujian surja pada motor BLDC. Data yang dihasilkan memiliki selisih data dari nilai EAR yang direkomendasikan oleh Baker [16] dikarenakan beberapa faktor yang memperngaruhi hasil pengujian. Dalam hal ini masih dapat ditoleransi karena selisih *error* yang cukup kecil.

*Halaman ini sengaja dikosongkan*

## **BAB 5**

### **KESIMPULAN**

#### **5.1 Kesimpulan**

Dari hasil penelitian yang telah dilakukan pada studi ini maka dapat disimpulkan bahwa:

1. Nilai resistansi dan Induktansi pada belitan motor sangat mempengaruhi besar frekuensi gelombang surja. Semakin besar nilai resistansi dan induktansi pada belitan akan mengakibatkan nilai frekuensi gelombang surja yang semakin kecil
2. Pada pengujian normal motor BLDC, nilai *threshold test-reff* EAR yang didapatkan dibawah 10% sehingga masih dibawah kriteria *pass/fail* yang sesuai dengan kriteria *pass/fail* Baker.
3. Saat terjadi *short* pada belitan motor, maka respon gelombang surja yang terbentuk akan sedikit bergeser jika dibandingkan dengan gelombang surja ketika dalam kondisi normal.
4. Pada motor BLDC kondisi *short* paralel kawat pada fasa A, nilai *threshold test-reff* EAR memiliki nilai minimal 22.09%, rata-rata 57.48% ,dan maksimal 88.38%. Nilai *threshold test-reff* EAR pada fasa A melebihi kriteria *pass/fail* yang mengindikasikan terjadi gangguan akibat *short* pada fasa A.
5. Pada motor BLDC kondisi *short* paralel kawat pada fasa B, nilai *threshold test-reff* EAR memiliki minimal 12.78%, rata-rata 33.26%, dan maksimal 53.97%. Nilai *threshold test-reff* EAR pada fasa B melebihi kriteria *pass/fail* yang mengindikasikan terjadi gangguan akibat *short* pada fasa B
6. Pada motor BLDC kondisi *short* paralel kawat pada fasa C, nilai *threshold test-reff* EAR memiliki nilai minimal 11.47%, rata-rata 34.42%, dan maksimal 57.23%. Nilai *threshold test-reff* EAR pada fasa C melebihi kriteria *pass/fail* yang mengindikasikan terjadi gangguan akibat *short* pada fasa C.
7. Jika nilai *threshold test-reff* EAR pada kondisi *short* lebih besar dari nilai *threshold test-reff* EAR pada kondisi normal maka pada belitan motor terjadi gangguan akibat hubung singkat fasa ke tanah.

## 5.2 Saran

Untuk pengembangan penelitian berikutnya penulis memiliki beberapa saran yang diharapkan dapat membantu memperbaiki penelitian ini. Berikut adalah beberapa saran dari penulis.

1. Penggunaan variasi motor BLDC untuk perolehan data yang lebih bermacam-macam untuk penentuan *threshold*
2. Penambahan variasi pada saat pengujian *short* pada motor BLDC
3. Penggunaan motor BLDC dengan rotor terpasang untuk mengetahui perbandingan dengan motor tanpa rotor terpasang.

## DAFTAR PUSTAKA

- [1] A. Tashakori and M. Ektesabi, "Fault Diagnosis of In-wheel BLDC Motor Drive for Electric Vehicle Application," *2013 IEEE Intell. Veh. Symp.*, no. Iv, pp. 925–930, 2013.
- [2] M. A. Awadallah, S. Member, M. M. Morcos, and S. Member, "Identification of Stator-Winding Insulation Failure in PM Brushless DC Motors," no. October 2003, 2015.
- [3] I. M. Y. Negara, P. Sakti, D. Fahmi, and D. A. Asfani, "Oscillating circuit design for inter-turn fault diagnostic in low-voltage induction motor," *Proc. - 2014 Int. Conf. Electr. Mach. ICEM 2014*, pp. 1922–1926, 2014.
- [4] I. M. Y. Negara, *Teknik Tegangan Tinggi - Prinsip dan Aplikasi Praktis*, 1 st. Graha Ilmu, 2013.
- [5] T. J. E. Miller, *Brushless Permanent-Magnet and Reluctance Motor Drives (Monographs in Electrical and Electronic Engineering 21)*, no. 21. 1989.
- [6] T. A. Faculty, S. Grubic, and I. P. Fulfillment, "Online Monitoring of Turn Insulation Deterioration in Mains-Fed Induction Machines Using Online Surge Testing Online Monitoring of Turn Insulation Deterioration in Mains-Fed Induction Machines Using Online Surge," 2011.
- [7] M. A. Eissa, M. S. Ahmed, R. R. Darwish, and A. M. Bassiuny, "Unknown InputsPI Observer-Based Sensor Fault Detection Technique for BLDC Motor," no. Icmic, pp. 18–21, 2015.
- [8] S. Grubic, J. Restrepo, J. M. Aller, B. Lu, and T. G. Habetler, "A new concept for online surge testing for the detection of winding insulation deterioration in low-voltage induction machines," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 47, no. 5, pp. 2051–2058, 2011.
- [9] E. Machinery and P. Engineering, "IEEE Std 522-2004 (Revision of IEEE Std 522-1992)," *IEEE Std 522-2004 (Revision IEEE Std 522-1992)*, vol. 2004, no. August, p. 0\_1-18, 2004.
- [10] S. Grubic, J. Restrepo, and T. G. Habetler, "Online surge testing applied to an induction machine with emulated insulation breakdown," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 49, no. 3, pp. 1358–1366, 2013.
- [11] E. M. Committee, "IEEE Guide for Testing Turn-to-Turn Insulation on Form-Wound Stator Coils for Alternating-Current Rotating Electric," vol. 1992, 1993.

- [12] J. Wilson, “Current state of surge testing induction machines,” *Iris Rotating Mach. Conf.*, no. June, pp. 1–13, 2003.
- [13] H. A. Toliyat, J. C. Moreira, and B. Harbor, “DC MOTOR,” pp. 1683–1688, 2000.
- [14] S. Sheet, “Entube DE-HB-S,” no. 708, pp. 1–2.
- [15] N. I. Diadem, “NI DIAdem,” no. May, 2014.
- [16] “CURRENT STATE OF SURGE TESTING INDUCTION MACHINES.” Baker Instrument Company, Jun-2003.

## LAMPIRAN

### List Program Arduino

```
int pin_out = 13;

int pin_out2 = 12;
//12 ke relay, 13 ke IGBT`
void setup()
{
    // put your setup code here, to run once:
    Serial.begin(9600);
    pinMode(pin_out,OUTPUT);
    pinMode(pin_out2,OUTPUT);
    Serial.println("pilih saklar");
    Serial.println("1. saklar 1 ");
    Serial.println("2. saklar 2 ");
}
void lcd()
{Serial.println("pilih saklar");
Serial.println("1. saklar 1 ");
Serial.println("2. saklar 2 ");}
void loop()
{
    unsigned int data;
    int coba;
    if(Serial.available()>0)
    {
        data=Serial.read();
        if(data==52)//4 Gelombang bagus
        {
            Serial.println("saklar 2 on.....");
            digitalWrite(pin_out2,HIGH);
            delay(5000);
            digitalWrite(pin_out2,LOW);
            delay(1);
            digitalWrite(pin_out,HIGH);
```

```
Serial.println("saklar 2 off.....");  
delay(3000);  
digitalWrite(pin_out,LOW);  
Serial.println("saklar 1 off.....");  
lcd();  
}  
}
```



## BIODATA PENULIS



Penulis memiliki nama lengkap Achmad Irmawanto Shodek. Penulis lahir di Ponorogo pada tanggal 17 Maret 1996. Penulis telah menyelesaikan pendidikan di SDN 1 Gelanglor 2008. Penulis juga telah menyelesaikan pendidikan jenjang SMP di SMPN 6 Kec. Ponorogo pada tahun 2011, jenjang SMA di SMAN 1 Ponorogo pada tahun 2014 . Penulis tengah melanjutkan studi kuliah di program S1 Teknik Elektro bidang studi Teknik Sistem Tenaga, Departemen Teknik Elektro, Fakultas Teknologi Elektro ITS Surabaya. Penulis memiliki hobby bermain sepak bola, bola voli dan membaca buku. Penulis dapat dihubungi melalui email [Achmad.shodek14@mhs.ee.its.ac.id](mailto:Achmad.shodek14@mhs.ee.its.ac.id).